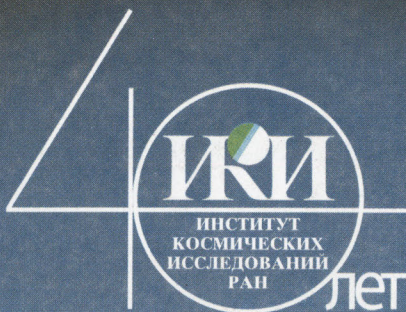


ЗЕМЛЯ И ВСЕЛЕННАЯ

КОСМОНАВТИКА
АСТРОНОМИЯ
ГЕОФИЗИКА

ИЮЛЬ—АВГУСТ

4/2005



ПАРТНЕРСТВО
PARTNERS

Научно-популярный журнал
Российской академии наук
Издается под руководством
Президиума РАН
Выходит с января 1965 года
6 раз в год
Академиздатцентр
"Наука"
Москва

Земля и Вселенная

4/2005

Новости науки и другая информация: Солнце в феврале – марте 2005 г. [76]; Атмосфера Энцелада [78]; Наблюдения атмосферы и поверхности Титана [79]; Одинадцатая экспедиция на МКС [80]; Новые книги [93, 110, 111]

В номере:

К 40-ЛЕТИЮ ИНСТИТУТА КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАН

- 3 ЗАЙЦЕВ Ю.И. Центр российской космической науки
- 17 МАТВЕЕНКО Л.И. РСДБ – суперразрешение
- 26 САВИН С.П. Магнитный щит Земли
- 34 ИЗМОДЕНОВ В.В. Граница гелиосферы
- 46 ШАРКОВ Е.А. Тропические циклоны: взгляд из космоса
- 55 АСТАФЬЕВА Н.М. 46 мега столетий жизни планеты
- 64 ЧЕРЕПАШУК А.М. Космические исследования и проблема черных дыр во Вселенной

ГИПОТЕЗЫ, ДИСКУССИИ, ПРЕДЛОЖЕНИЯ

- 81 РУДНИЦКИЙ Г.М. Планетные системы красных гигантов

ЛЮБИТЕЛЬСКАЯ АСТРОНОМИЯ

- 94 Небесный календарь: сентябрь–октябрь 2005 г.
- 100 Киселев С.В. Обсерватория на дачном участке

ДОСЬЕ ЛЮБОЗНАТЕЛЬНЫХ

- 105 Внесолнечные планетные системы (часть I)



© Российская академия наук
© Редакция журнала
"Земля и Вселенная" (составитель), 2005 г.

Zemlya i Vselennaya (Earth and Universe); Moscow, Maronovsky per., 26, f. 1965, 6 a year; by the Nauka (Science) Publishing House; Joint edition of the Russian Academy of Sciences and the Society of Astronomy and Geodesy; popular; current hypotheses of the origin and development of the Earth and Universe; astronomy, geophysics and space research; Chief Editor V.K. Abalakin; Deputies Editors V.M. Kotlyakov, E.P. Levitan

На стр. 2 обложки: Экипаж одиннадцатой основной экспедиции на Международную космическую станцию: российский космонавт С.К. Крикалёв (командир экспедиции) и КК "Союз ТМА-6" и астронавт NASA Дж. Филлипс (бортинженер экспедиции). Фото NASA (к стр. 80).

На стр. 3 обложки: Снимки Титана, полученные: а) АМС "Кассини" при подлете к Титану (NASA); б) с помощью прибора SDI Очень Большого Телескопа (ESO, Чили). Отмечено место посадки на поверхности Титана европейского зонда "Гюйгенс" (к стр. 79).

На стр. 4 обложки: Туманности Северная Америка и Пеликан в созвездии Лебедя. Объектив "Юпитер-37А" 135/3,5, Сапон 300D ISO 1600, выдержка – 900 с (к ст. С.В. Киселева).

In This Issue:

TO THE 40TH ANNIVERSARY OF THE INSTITUTE OF SPACE RESEARCH OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCE

- 3 ZAJTZEV Ju.I. Centre of Russian Space Science
- 17 MATVEENKO L.I. VLBI – Super resolving power
- 26 SAVIN S.P. Magnetic Shield of the Earth
- 34 IZMODENOV V.V. Boundary of Geliosphere
- 46 SHARKOV E.A. Tropic Cyclones: Look from Space
- 55 ASTAFJEVA N.M. 46 Megacenturies of Planet Life
- 64 CHEREPASHUCK A.M. Space Researches and Problems of Black Holes in Universe

HYPOTHESES, DISCUSSIONS, SUGGESTIONS

- 81 RUDNITZKIJ G.M. Planetary Systems of Red Giants

AMATEUR ASTRONOMY

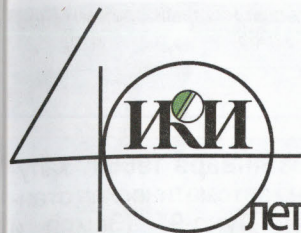
- 94 Celestial Calendar: September–October 2005
- 100 KISELEV S.V. Observatory in the Country-House

DOSSIET FOR THE CURIOUS

- 105 Planetary Systems Outside Solar System (part I)

Редакционная коллегия

Главный редактор член-корреспондент РАН В.К. АБАЛАКИН
Зам. главного редактора академик В.М. КОТЛЯКОВ
Зам. главного редактора доктор педагогических наук Е.П. ЛЕВИТАН
доктор физ.-мат. наук А.А. ГУРШТЕЙН,
член-корр. РАН Л.М. ЗЕЛЕНЬКИЙ,
доктор филос. наук В.В. КАЗЮТИНСКИЙ,
доктор физ.-мат. наук Л.И. МАТВЕЕНКО,
член-корр. РАН И.И. МОХОВ, член-корр. РАН А.В. НИКОЛАЕВ,
член-корр. РАН И.Д. НОВИКОВ, доктор техн. наук Г.А. ПОЛТАВЕЦ,
доктор геол.-мин. наук Г.И. РЕЙСНЕР,
доктор физ.-мат. наук Ю.А. РЯБОВ,
доктор физ.-мат. наук Ю.А. СУРКОВ,
доктор техн. наук Г.М. ТАМКОВИЧ,
академик АН Молдовы А.Д. УРСУЛ, член-корр. РАН А.М. ЧЕРЕПАЩУК,
доктор физ.-мат. наук В.В. ШЕВЧЕНКО



К 40-летию Института космических исследований РАН

Центр российской космической науки

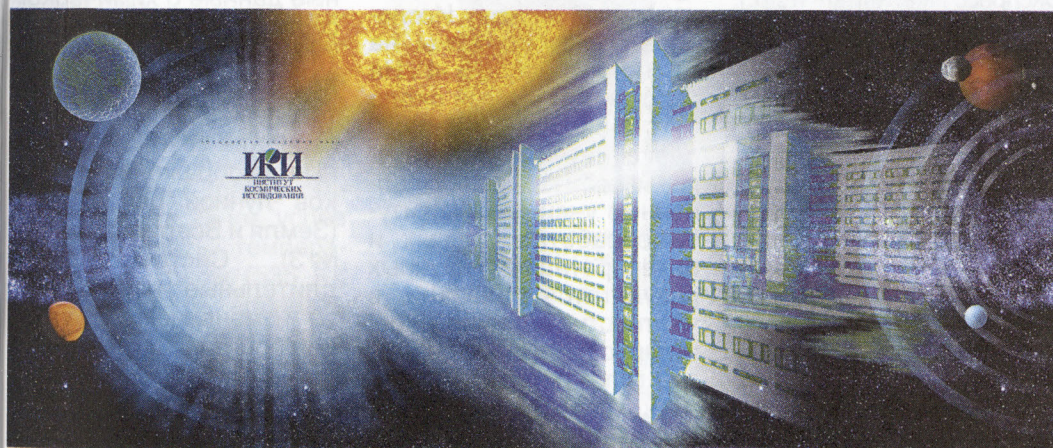
Ю. И. ЗАЙЦЕВ,
Институт космических исследований РАН

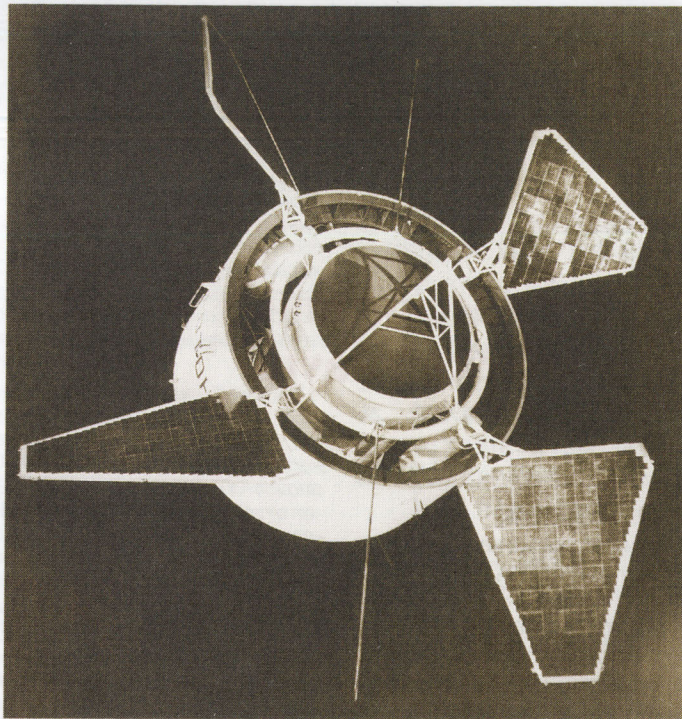
15 мая 2005 г. исполнилось 40 лет Институту космических исследований Российской академии наук. Созданный как головная академическая организация по исследованию и использованию космического пространства в интересах фундаментальной науки, Институт за прошедшие годы стал признанным центром советской, а затем российской космической науки (Земля и Вселенная, 2000, № 3).

Институт ведет научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по таким основным направлениям, как астрофизика высоких энергий и радиоастрономия, исследования планет и малых тел Солнечной системы, физика космической плазмы и солнечно-земная физика, дистанционное зондирование Земли, оптико-физические исследования, небесная механика и системы управления, теле-

коммуникационные сети и системы, космическое приборостроение, научно-образовательные программы.

Сотрудники Института принимали активное участие в исследованиях на космических аппаратах, запускаемых по национальным космическим программам (серии ИСЗ "Космос" и "Прогноз", АМС "Марс", "Венера", "Луна" и др.; пилотируемые корабли "Союз"; орбитальные станции "Салют" и "Мир"), в проек-





Тяжелый научный спутник "Протон" (1965).

31 января 1966 г. запущена автоматическая станция "Луна-9" (Земля и Вселенная, 1967, № 6). 3 февраля 1966 г. спускаемый аппарат станции впервые в мире совершил мягкую посадку на поверхность Луны и передал из района Океана Бурь панораму окружающего ландшафта. Выполненные при различных высотах Солнца над горизонтом, они дали возможность изучить микрорельеф лунного грунта, определить размеры и форму впадин и камней.

31 марта 1966 г. запущена автоматическая станция "Луна-10", 3 апреля 1966 г. она стала первым искусственным спутником Луны (ИСЛ; Земля и Вселенная, 1967, № 1). В течение 56 сут измерялись гамма-излучение поверхности, магнитное и гравитационное поля Луны. В дальнейшем были запущены еще три ИСЛ: "Луна-11", -12 и -14" (1966-1968). Получены косвенные данные о химическом составе и радиоактивности лунных пород. Установленная на "Луна-12" фототелевизионная система передала крупномасштабные изображения участков лунной поверхности (Земля и Вселенная, 1975, № 3). Систематические длительные наблюдения за изменением параметров орбит ИСЛ позволили уточнить соотношение масс Земли и ее естественного спутника и дан-

тах, осуществляемых в рамках международного сотрудничества ("Союз"-"Аполлон", "АРАКС", "СНЕГ", "Радуга", "Интеркосмос", "Ореол", "ВЕГА", "Фобос", "Гранат", "Рентген", "Гамма", "Интербол" и др.), а также, особенно активно в последние годы, как соисполнители в зарубежных космических проектах ("Марс Экспресс", "Интеграл" и др.).

В одних проектах ученые и специалисты Института разрабатывали и испытывали бортовые комплексы научной аппаратуры, а затем проводили исследования с их помощью. В других занимались получением и обработкой научной информации с космических аппаратов, ее анализом и интерпретацией.

Напомним об основных космических проектах, в

которых Институт принимал участие.

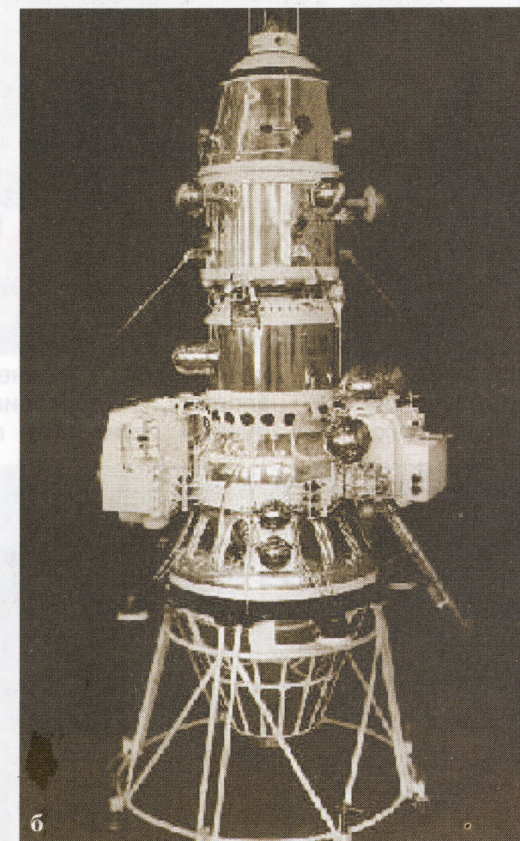
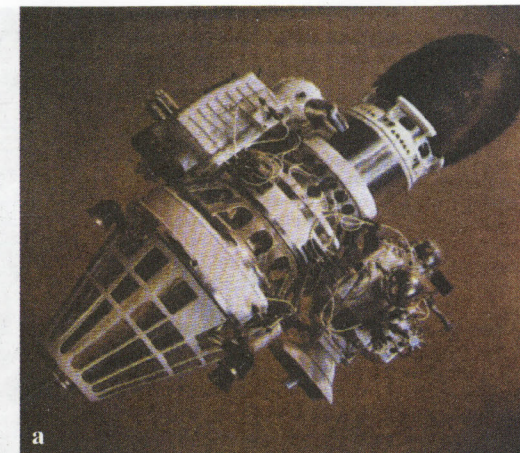
16 июля 1965 г. запущена самая тяжелая в то время научная космическая лаборатория "Протон" массой 12,2 т (масса научной аппаратуры — 3,5 т) для комплексного изучения космических лучей и взаимодействия с веществом частиц сверхвысоких энергий (Земля и Вселенная, 1965, № 4). Исследования продолжены на ИСЗ "Протон-2, -3 и -4". На "Протоне-4" массой около 17 т был установлен комплекс научной аппаратуры массой 12,5 т. Выполненные учеными Института обработка данных и интерпретация научных результатов показали, в частности, наличие нерегулярности в спектре частиц галактических космических лучей вблизи энергий 10–12 эВ.



Спускаемый аппарат АМС "Венера-4" (1967).

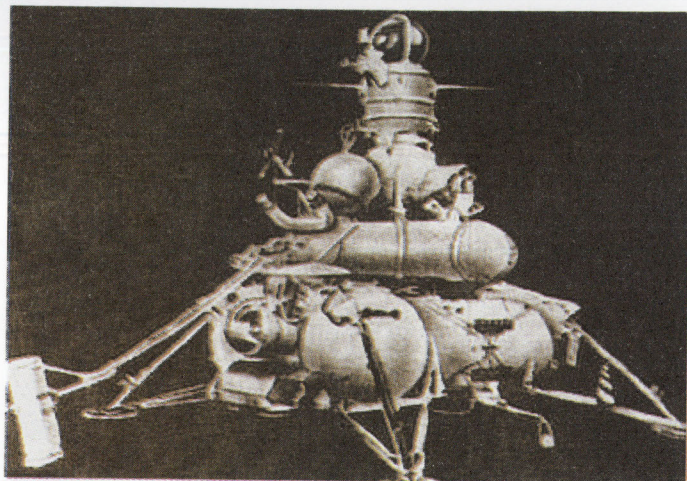
ные о гравитационном поле Луны, ее форме (Земля и Вселенная, 1975, № 2). Изучались также космические лучи и потоки идущих от Солнца заряженных частиц.

12 июня 1967 г. запущена АМС "Венера-4" — первый космический аппарат, выполнивший прямые измерения в атмосфере другой планеты (Земля и Вселенная, 1967, № 6). Во время парашютного спуска в атмосфере Венеры спускаемый аппарат станции передавал информацию 94 мин. Измерялись температура, давление, скорость ветра, содержание CO_2 , N_2 и H_2O на высотах 25–55 км. Выяснилось, что атмосфера состоит на 90–95% из CO_2 , азот не найден. Спускаемый аппарат "Венеры-4" разрушился на высоте 25 км, успев зафиксировать температуру атмосферы (535 К). На пролетном аппарате проводились измерения космической плазмы и ультрафиолетовой радиации. Открыта протяжен-



Автоматические межпланетные станции: а) "Луна-9", б) "Луна-10" (1966).

ная водородная корона и -6" (1969) выполнялись Венеры. В последующих аналогичные измерения с запусках АМС "Венера-5



АМС "Луна-16", впервые доставившая на Землю образцы лунного грунта (1970).

летных и спускаемых аппаратов, разрушившихся на высоте 18 км (Земля и Вселенная, 1969, №№ 3, 4). 15 декабря 1970 г. "Венера-7" впервые совершила мягкую посадку на поверхность планеты (Земля и Вселенная, 1971, № 2).

Исследования Венеры были продолжены на спускаемых аппаратах АМС

"Венера-9-14". Станции "Венера-15 и -16" с октября 1983 г. исследовали планету с орбиты ИСВ (Земля и Вселенная, 1983, № 4; 1984; № 1).

12 сентября 1970 г. стартовала АМС "Луна-16" — первый автоматический космический аппарат, доставивший лунный грунт (105 г) на

Землю (Земля и Вселенная, 1970, № 6; 1971, № 2).

"Луна-24", запущенная 9 августа 1976 г., доставила на Землю 170.1 г грунта, образцы взяты с глубины около 2 м (Земля и Вселенная, 1977, № 1).

17 ноября 1970 г. на Луну десантирован первый самоходный автоматический аппарат — "Луноход-1" ("Луна-17"). С его помощью детально обследована лунная поверхность в Море Дождя на площади 80 тыс. м², получено более 200 панорам и свыше 20 тыс. снимков поверхности, проведены анализ грунта и исследования его механических свойств, а в 25 точках определен химический состав грунта (Земля и Вселенная, 1971, №№ 3-5; 1972, № 2). Длительность активного существования "Лунохода-1" превысила 300 сут. Управлял луноходом с Земли сменный экипаж из 5 человек, в число которых входили и сотрудники ИКИ (Земля и Вселенная, 2005, № 2).

"Луноход-2" (доставлен на Луну 16 января 1973 г. с помощью автоматической станции "Луна-21") проработал на лунной поверхности в Море Ясности около 150 земных, или 5 лунных, суток.

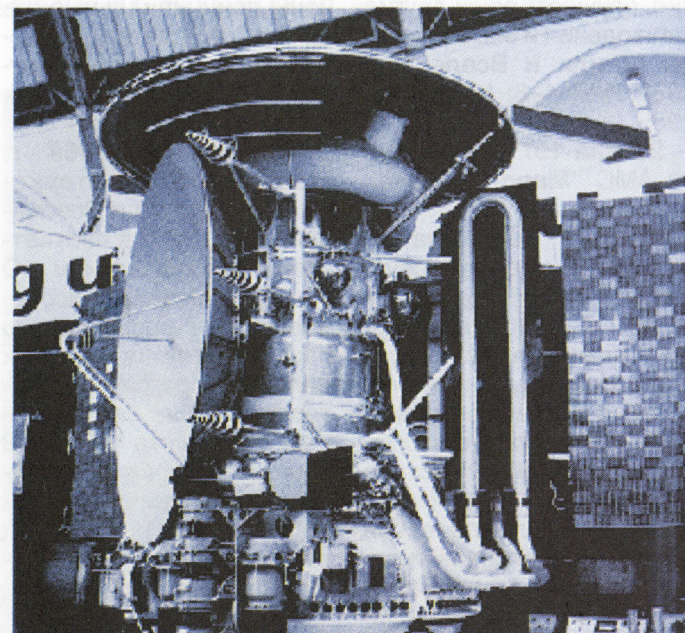
Самоходный аппарат "Луноход-1" (1970).

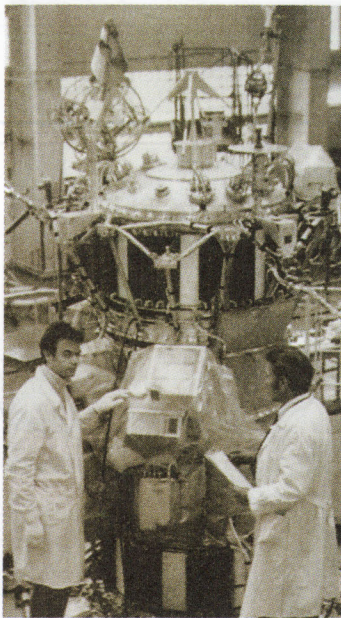
Орбитальная пилотируемая станция "Салют". Рисунок космонавта А.А. Леонова и художника А.К. Соколова.

Установленные на нем дополнительные приборы и повышенная работоспособность бортовых систем позволили выполнить значительно больший объем исследований, чем на "Луноходе-1" (Земля и Вселенная, 1973, №№ 2, 4).

19 апреля 1971 г. запущена первая долговременная орбитальная пилотируемая станция "Салют" (Земля и Вселенная, 1971, № 4; 1972, № 2). На ней проводились исследования спектров звезд в УФ- и гамма-диапазоне, потоков заряженных частиц, первичного космического излучения, потоков нейтронов и гамма-квантов. На "Салюте-4" (1974-1977) регистрировались спектры солнечных вспышек, поток нейтронов и гамма-квантов, излучение рентгеновских источников (Земля и Вселенная, 1975, №№ 1, 4; 1976, № 4). На станции второго поколения с двумя стыковочными узлами "Салют-6" (1977-1982) наблюдались астрофизические источники в УФ-, ИК-, сантиметровом и радиодиапазоне (Земля и Вселенная, 1978, № 5; 1979, №№ 3-5). Аппаратура "Салюта-7" (1982-1986) исследовала рентгеновские

АМС "Марс-3", впервые совершившая посадку на Марс (1971).





Испытания спутника "Ореол-3" на космодроме (1981).

источники, фоновые потоки гамма-квантов и заряженных частиц, ионизованное космическое излучение, осуществлены другие наблюдения и эксперименты (Земля и Вселенная, 1982, №№ 4–6; 1984, № 3; 1985, № 2).

28 мая 1971 г. запущен АМС "Марс-3" (Земля и Вселенная, 1971, № 4; 1972, № 6). Вышла на орбиту искусственного спутника Марса 2 декабря 1971 г. и доставила посадочный аппарат на поверхность планеты. В течение 4 месяцев выполнялись ИК-радиометрия, фотометрия, измерения состава атмосферы, магнитного поля и околопланетной плазмы. Орбитальный отсек прекратил работу в августе 1972 г. Исследо-

вания планеты продолжены АМС "Марс-5" с орбиты ИСМ (вышла на орбиту 12 февраля 1974 г.; Земля и Вселенная, 1974, № 5). Получены изображения поверхности Марса в Южном полушарии и другие научные данные. Результаты измерений характеристик атмосферы передал 12 марта 1974 г. спускаемый аппарат АМС "Марс-6".

27 декабря 1971 г. запущен ИСЗ "Ореол", началась реализация советско-французского проекта "Аркад" по исследованию взаимодействия магнитосферы и ионосферы. Спустя два года исследования были продолжены на аналогичном спутнике "Ореол-2", а с сентября 1981 г. — на "Ореоле-3". Особая ценность выполненных ИСЗ "Ореол-3" экспериментов в том, что они были скоординированы с наземными и ракетными измерениями. Получены принципиальные научные результаты, ставшие важной вехой в изучении околоземной плазмы.

14 октября 1969 г. стартовал ИСЗ "Интеркосмос-1" (Земля и Вселенная, 1969, № 6) в соответствии с соглашением «О сотрудничестве в исследовании космического пространства в мирных целях по программе "Интеркосмос"», подписанным 13 августа 1971 г. В рамках программы запущено 23 спутника "Интеркосмос" и 11 высотных ракет "Вертикаль" (Земля и Вселенная, 1971, №№ 3, 4, 6; 1981, № 5; 1984, № 6).

С их помощью проводились исследования УФ- и рентгеновского излучений Солнца, спорадического солнечного радиоизлучения, процессов в верхней атмосфере Земли, низкочастотных электромагнитных излучений, динамики радиационных поясов, космических лучей сверхвысоких энергий, электромагнитной связи магнитосферы с ионосферой, а также исследования Земли из космоса.

14 апреля 1972 г. выведен на орбиту первый высокоапогейный спутник серии "Прогноз", предназначенный для изучения солнечно-земных связей — процессов солнечной активности и их влияния на межпланетную среду и магнитосферу и ионосферу Земли (Земля и Вселенная, 1972, № 6). В 1972–1983 гг. осуществлено десять успешных запусков спутников данной серии, проведены наблюдения в течение одиннадцатилетнего цикла солнечной активности. Научная аппаратура "Прогноза-1" включала приборы для исследований электромагнитного излучения Солнца, потоков солнечных космических лучей и частиц высоких энергий вне и внутри магнитосферы Земли, регистрации характеристик плазмы солнечного ветра за пределами магнитосферы Земли и внутри магнитосферы, приемники радиоизлучения, магнитометр, аппаратуру для измерения доз проникающего излучения на трассе полета. На последующих

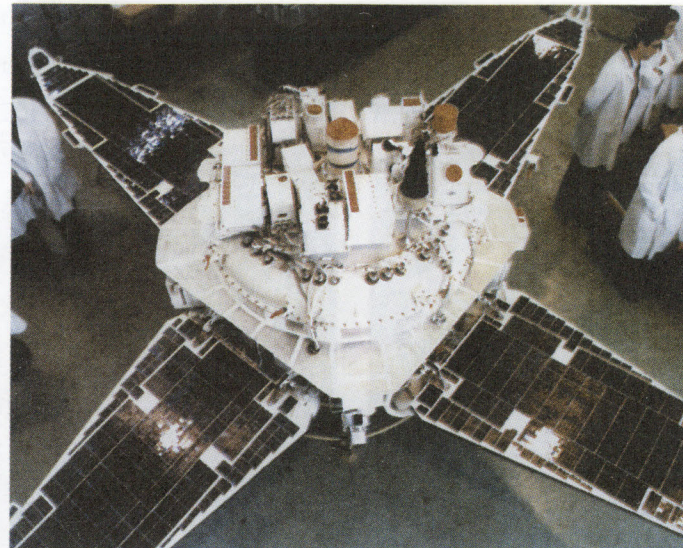
Научный спутник серии "Прогноз" (1983).

ИСЗ "Прогноз" состав аппаратуры расширился.

Созданный в ИКИ высокочувствительный радиометр "Реликт", установленный на "Прогнозе-9" (запущен 1 июля 1983 г.), открыл новые возможности решения космологических проблем, связанных со структурой и эволюцией Вселенной, образованием галактик. Необычно высокая орбита спутника "Прогноз-9", почти достигавшая точки либрации в хвосте магнитосферы — 1.5 млн. км, помимо важных результатов измерений микроволнового излучения позволила получить интересные данные по физике солнечного ветра (Земля и Вселенная, 1984, № 4; 1992, № 3).

С помощью ИСЗ "Прогноз-10" (запущен 10 октября 1985 г.) проведен эксперимент "Интершок", подготовленный учеными Института. Получена уникальная информация о структуре околоземной ударной волны на границах магнитосферы.

В январе–феврале 1975 г. реализован советско-французский эксперимент "АРАКС" (ARAKS, Artificial Radiation and Auroral, Kerguelen — Soviet Union — искусственная радиация и полярное сияние) по искусственной ин-



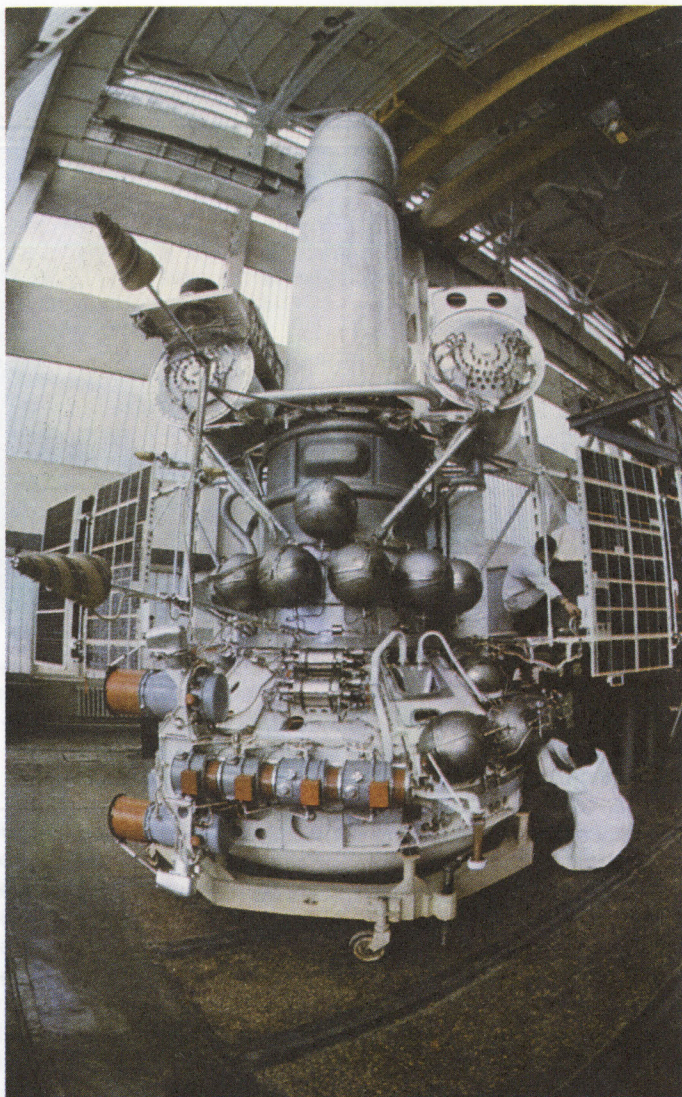
жекции электронов и плазменных струй в ионосфере с борта ракет (запуски осуществлялись с о. Кергелен в Индийском океане) и исследованию сопутствующих им эффектов в магнитосфере и ионосфере Земли. Эксперимент позволил проверить гипотезы о строении магнитосферы и поведении частиц

в ней, механизмах генерации полярных сияний.

23 марта 1983 г. выведен на высокоапогейную орбиту первый советский специализированный ИСЗ для астрофизических наблюдений — космическая обсерватория "Астрон" (Земля и Вселенная, 1984, №№ 2, 5; 1989, № 4). Успешно функционировала



Ракета "Эридан" готова к старту с о. Кергелен по проекту "АРАКС" (1975).



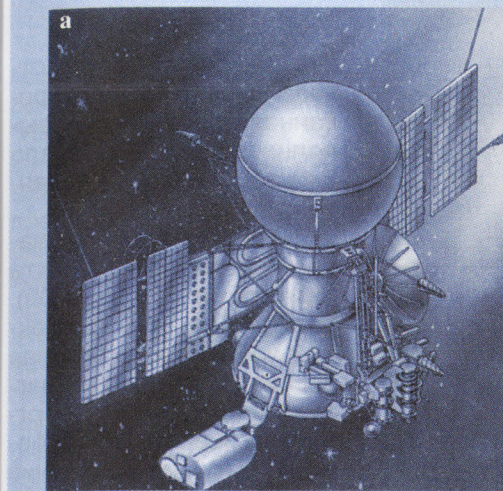
Космическая обсерватория "Астрон" (1983).

атмосферу планеты, изучали ее циркуляцию и метеорологические параметры. Совершив гравитационный маневр у планеты, станции направились к комете Галлея, пролетев в марте 1986 г. в непосредственной близости от кометы. Получены изображения ядра и пылевых структур внутренней комы, выполнены измерения плазменной среды, потоков пыли, определены их состав (Земля и Вселенная, 1985, №№ 1, 5; 1986, №№ 3, 5).

20 февраля 1986 г. запущен базовый блок орбитальной научной станции "Мир" с шестью стыковочными узлами (Земля и Вселенная, 1986, № 6). За 15 лет на комплексе "Мир" побывало 105 космонавтов, 10 лет он эксплуатировался в пилотируемом режиме, проведено около 18 тыс. экспериментов, во многих из которых приняли участие ученые Института (Земля и Вселенная, 2001, № 5). Начиная с 1987 г. с помощью обсерватории "Рентген", установленной на модуле "Квант" станции, изучались рентгеновские источники. Наиболее интересны результаты наблюдений Сверхновой 1987A (Земля и Вселенная, 1988, № 5; 2000, № 6).

7 и 12 июля 1988 г. запущены АМС "Фобос-1 и -2". Планировалось вывести их на орбиту ИСМ

Международный проект "ВЕГА" для исследования Венеры и кометы Галлея: а) АМС "ВЕГА", б) снимок ядра кометы Галлея (март 1986 г.).



близкую к орбите Фобоса. Программа предусматривала многократные сближения с Фобосом, пассивные и активные дистанционные исследования его поверхности, посадку на нее малых станций. В сентябре 1988 г. "Фобос-1" был потерян на пути к Марсу. "Фобос-2" выведен на орбиту ИСМ в феврале 1989 г. За два месяца его работы получено гораздо больше данных, чем во всех других отечественных марсианских программах. Впервые были проведены масс-спектрометрические измерения, которые позволили обнаружить плазменные слои в магнитном хвосте Марса (Земля и Вселенная, 1987, № 4; 1988, №№ 3, 6; 1989, № 5).

Обсерватория "Рентген" на модуле "Квант" орбитального комплекса "Мир" (1987–2001).

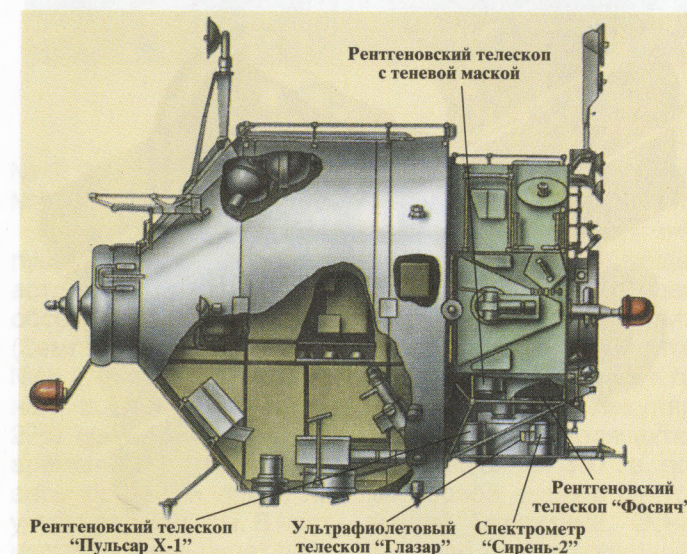
1 декабря 1989 г. выведена на орбиту космическая рентгеновская обсерватория "Гранат". Среди важнейших результатов наблюдений — открытие вспыхивающего рентгеновского пульсара, слежение за изменением периодов

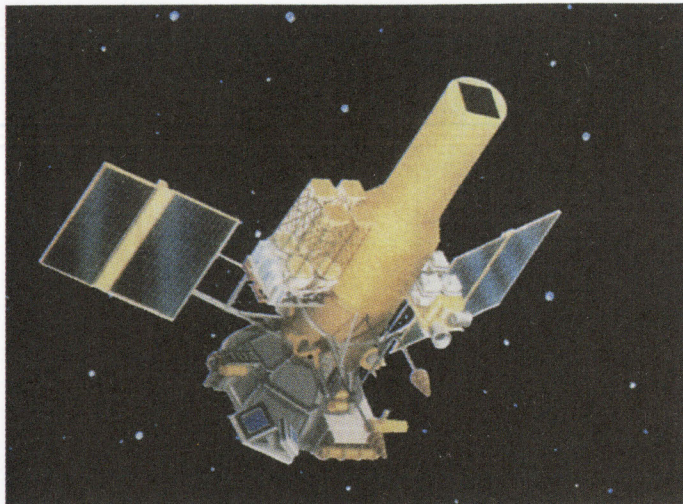
вращения 12 рентгеновских пульсаров, обнаружение десятков рентгеновских всплесков от нейтронных звезд — барстеров. Обсерватория "Гранат" работала в космосе почти 10 лет (Земля и Вселенная, 1989, № 3; 1993, № 6; 1998, № 6).

свыше 7 лет, установив рекорд длительности работы в космосе. Система ориентации позволяла наводить телескопы в любую точку неба с точностью 2–3'. Примерно такой же была и точность стабилизации. Разработанный в Институте рентгеновский телескоп имел эффективную площадь 1750 см², поле зрения 3' и временное разрешение 2.7 м/с. Иссле-

дованы нестационарные явления в звездах, аномалии их химического состава, УФ-излучение звезд и галактик.

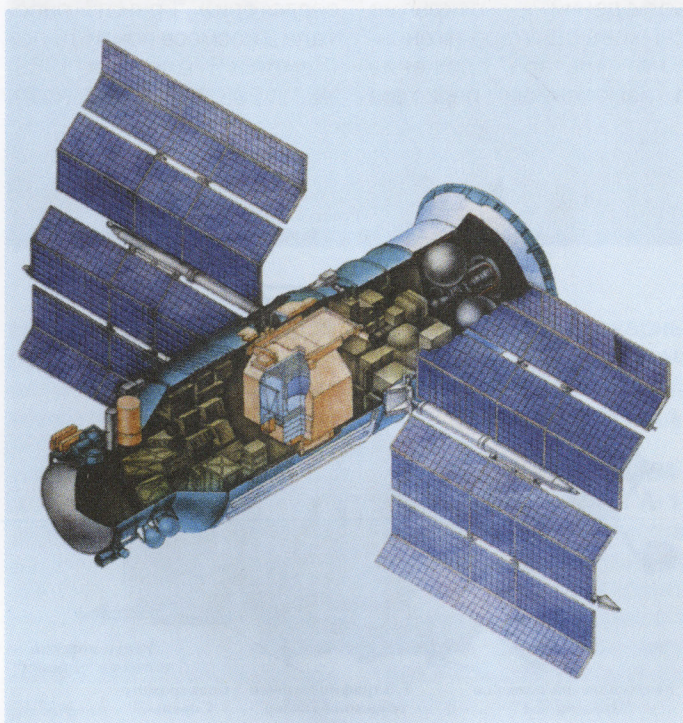
15 и 21 декабря 1984 г. запущены АМС "ВЕГА-1 и -2", продолжившие исследования атмосферы, облачного слоя и поверхности Венеры с помощью спускаемых аппаратов (июнь 1985 г.). Аэростатные зонды станций, введенные в





11 июля 1990 г. запущена космическая гамма-обсерватория **“Гамма”**. На ее борту были установлены телескопы **“Гамма-1”** для детального исследования гамма-излучения

высоких энергий (от 50 МэВ до 5 ГэВ), работавшие в “мягком” гамма-диапазоне **“Диск-М”** (от 20 кэВ до 5 МэВ) и **“Пульсар X-2”** для наблюдения рентгеновских источни-



Космическая астрофизическая рентгеновская обсерватория **“Гранат”** (1989–1998).

ков (2–25 кэВ). Из-за отказа систем запланированная программа не выполнена, получено мало данных (Земля и Вселенная, 1991, №№ 3, 4).

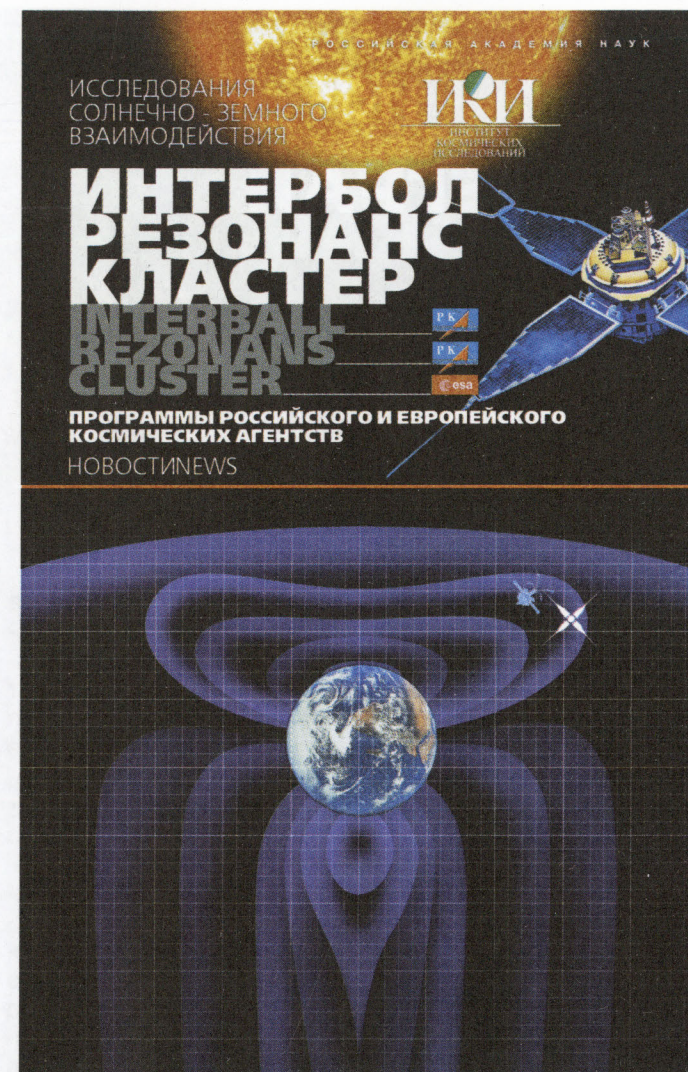
3 августа 1995 г. началась реализация проекта **“Интербол”** (1995–2000). В самом названии проекта определилась главная его задача – поиск в магнитосферной плазме огненных шаров (**“файрболов”**) и исследование взрывных процессов нагрева и ускорения в них плазмы, приводящих к вспышкам полярных сияний и магнитным бурям. По проекту запущены две пары **“спутник – субспутник”**. Первая, с апогеем 200 тыс. км, выполняла измерения в хвосте магнитосферы, каспах, вблизи магнитопаузы, магнитослоя и солнечном ветре. Вторая, с апогеем 20 тыс. км, исследовала магнитосферную плазму над овалом полярных сияний, полярной шапкой и в каспе на средних высотах. Система из двух основных аппаратов **“Интербол”** и двух субспутников **“Магикон”** позволила детально исследовать процессы одновременно в различных областях околоземного космического пространства, разделить пространственные и временные вариации измеряемых па-

Космическая гамма-обсерватория **“Гамма”** (1990–1992).

Международный проект **“Интербол”** (1995–1997).

раметров. Измерения, выполненные по проекту **“Интербол”**, принесли новую информацию, заставившую пересмотреть представления о процессах в плазменном слое магнитосферы, изучить крупномасштабную динамику ее возмущений при выбросе из внешних областей Солнца (солнечной короны) больших масс горячей плазмы и формирование гигантских **“магнитных облаков”** в солнечном ветре. Удалось исследовать глобальную перестройку всей магнитосферной системы. Результаты измерений оказали существенное влияние на представления о физике магнитосфер больших планет, а также на теорию процессов в далеких астрофизических объектах (Земля и Вселенная, 1992, № 6; 1997, № 3; 1999, № 5).

7 апреля 2001 г. запущена американская АМС **“Марс Одиссей”**. Разработанный в Институте и установленный на борту станции нейтронный детектор HEND успешно выполнил одну из основных задач миссии – исследование нейтронного излучения Марса. По данным прибора обнаружены огромные запасы воды непосредственно под поверхностью Марса и измерена динамика сезонных отложений углекислоты на поверхности планеты (Земля и Вселенная, 2002,



№ 3; 2003, №№ 1, 6; 2005, № 2).

17 октября 2002 г. запущена Международная астрофизическая гамма-обсерватория **“Интеграл”** (Земля и Вселенная, 2003, №№ 2, 6). Российские ученые получили право на 27% ее наблюдательного времени. Уже первые сеансы принесли яркие научные результаты. В частности, в гамма-лучах пост-

роена детальная карта центра нашей Галактики с чувствительностью, значительно превышающей результаты всех предшествующих исследований. Открыто жесткое рентгеновское излучение от галактического молекулярного облака, находящегося на расстоянии 300 св. лет от черной дыры в центре нашей Галактики. Обнаружены новая популяция



гамма-источников и новый класс космических гамма-всплесков, светимость которых в тысячи раз ниже, чем у "стандартных".

2 июня 2003 г. началась первая европейская планетная миссия "Марс Экспресс". Проект был задуман как экспедиция спасения проекта "Марс-96", когда станция не вышла на траекторию полета к планете (Земля и Вселенная, 1996, № 4). Научные задачи и состав

аппаратуры проекта "Марс Одиссей" унаследованы от погибшего российского аппарата. Институт разработал и изготовил ряд узлов и блоков для спектрометров ОМЕГА, ПФС и СПИКАМ. Эти приборы до сих пор успешно работают на околомарсианской орбите. Спектральные измерения, выполненные с их помощью, позволили впервые напрямую обнаружить водяной лед в постоянной южной полярной шапке, дали ряд

Европейская космическая гамма-обсерватория "Интеграл" (2002).

других пионерских научных результатов. Кроме орбитального отсека, станция несла малый посадочный аппарат "Бигль-2". Ученые Института принимали участие в создании для него мессбауэровского спектрометра. К сожалению, посадка "Бигля-2" на поверхность Марса была неудачной (Земля и Вселенная, 2004, №№ 1, 3, 6; 2005, №№ 1, 2).

В январе-феврале 2004 г. на Марс доставлены американские марсоходы "Спирит" и "Оппортьюнити" (Земля и Вселенная, 2004, №№ 1, 3, 6; 2005, №№ 1, 2). На них впервые установлены мессбауэровский и альфарентгеновский спектрометры, осуществляющие минералогический и элементный анализ грунта. Сотрудники Института калибровали приборы и создали каталог спектров минералов – кандидатов для состава марсианского грунта. Уже первые данные позволили назвать основные группы минералов, составляющих марсианский грунт, – оливины (на Земле они имеются в лавовых породах) и силикаты.

Ученые Института в настоящее время разрабатывают научные приборы, которые будут установле-

Европейская АМС "Марс Экспресс" (2003). На ней установлен прибор, созданный учеными ИКИ РАН.



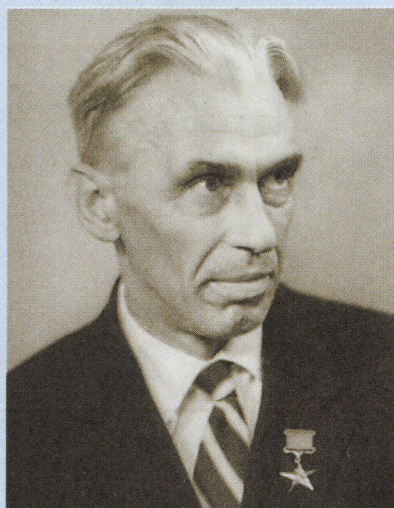
ны на космических аппаратах, планируемых к запуску в ближайшие годы (2005–2010). Институт участвует в перспективных национальных и междуна-

родных программах, выполняемых АМС "Венера Экспресс" (2005), ИСЗ "Коронас-Фотон" (2006), космическими обсерваториями "Радиоастрон"

(2007), "Спектр-УФ" (2008), "Спектр-Рентген-Гамма" (2009–2010), ИСЗ "Резонанс" (2009), АМС "Фобос-грунт" (2009) и АМС "Вери Colombo" (2009–2010).



Директора Института космических исследований РАН



Академик Г.И. Петров (1912–1987),
директор Института в 1965–1973 гг.



Академик А.А. Галеев, директор
Института в 1988–2004 гг.



Академик Р.З. Сагдеев, директор
Института в 1973–1988 гг.



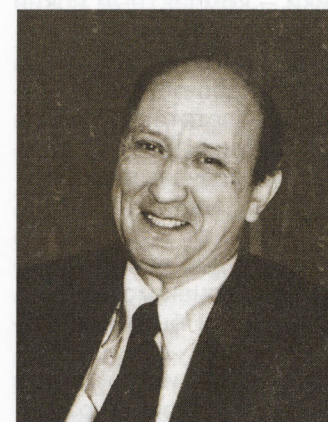
Член-корреспондент РАН Л.М. Зеле-
ный, директор Института с 2004 г.



РСДБ – суперразрешение

Л. И. МАТВЕЕНКО,
доктор физико-математических наук
Институт Космических исследований РАН

**Радиоинтерферомет-
рия со сверхдлинными
базами (РСДБ) открыла
новую страницу совре-
менной астрофизики. Раз-
решающая сила РСДБ в
десятки тысяч раз превы-
шает разрешающую силу
оптических телескопов.
И если оптическая труба
Галилея открыла чело-
вечеству Солнечную сис-
тему, то РСДБ – весь ок-
ружающий мир. Стали
доступны для исследова-
ний ядра галактик и ква-
зары, области формиро-**



**вания звезд и планетных
систем. Заложена прин-
ципиально новая основа
для решения прикладных
задач, в том числе астро-
метрии и геодинамики.
Современные прецизион-
ные навигационные сис-
темы GPS и “ГЛОНАСС”
немыслимы без РСДБ.
История создания и раз-
вития РСДБ непосредст-
венно связана с эпохой
освоения космического
пространства, с эпохой
развития новейших на-
укоемких технологий.**

ЦЕНТР ДАЛЬНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

В конце 1950-х гг. гото-
вятся к старту первые ко-
смические ракеты – “лун-
ники”. Физический инсти-
тут АН СССР получает
указание создать систему
для измерения координат
космических аппаратов.
Радиоастрономы решали
аналогичные задачи для
отождествления радиоис-
точников с оптически ви-
димыми объектами с по-

мощью радиоинтерферо-
метров. Их угловое раз-
решение определяется не
размерами антенн, а рас-
стоянием между ними. За-
ведующий Лабораторией
колебаний А.М. Прохо-
ров вылетает на Крым-
скую радиоастрономичес-
кую станцию (Кацивели)
для организации работ.
Работа контролирова-
лась Главным теоретиком
М.В. Келдышем и Главным
конструктором С.П. Коро-
лёвым.

К моменту старта пер-
вой космической ракеты
(2 января 1959 г.) измери-
тельный комплекс был
введен в действие: изме-
ряются траектории дви-
жения космических аппа-
ратов, определяется точ-
ка прилунения аппаратно-
го контейнера. Задача
была успешно решена и
получила высокую оценку
С.П. Королёва. Однажды
ночью он без сопровожда-
ющей свиты ознакомился
с измерительными ком-

плексами и был приятно удивлен, увидев более чем скромные технические средства фиановских радиоастрономов. В дальнейшем мы создали радиоинтерферометрический треугольник, на котором в мае 1960 г. обнаружили выбросы потоков плазмы на Солнце, измерили траектории. Скорости их движения превышали вторую параболическую, и через несколько дней потоки частиц достигли Земли, вызвав шумовые бури.

Сразу после запусков "лунников" вблизи Евпатории создается Центр дальней космической связи (ЦДКС). В состав измерительного комплекса входит интерферометр с базой 500 м. Его антенны АДУ-1000 состоят из восьми 16-м параболических зеркал, установленных на орудийных башнях линкора. ФИАН участвует в разработке интерферометра. Необходимо было обеспечить по тем временам необычайно высокую точность угловых измерений — порядка 0.1". Для этого были необходимы яркие компактные опорные источники. Для их "поиска" привлекаются В. Курильчик, Г. Хромов и Г. Шоломицкий, аспиранты И.С. Шкловского.

ИСТОЧНИКИ
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЧАСТИЦ —
ПЕРЕМЕННОСТЬ

Это была эпоха становления и бурного развития радиоастрономии, период переосмысления окружающего нас мира, перехода от наблюдений

объектов к изучению протекающих в них физических процессов. Объекты предстали перед исследователями как уникальные космические лаборатории. Одним из актуальнейших вопросов был вопрос об источниках релятивистских частиц, радиоизлучение которых мы и наблюдаем. Спектр известного радиоисточника Лебедь А имел излом. Н.С. Кардашёв объяснил эту особенность отличием возраста частиц. Объекты с подобными спектрами могли содержать искомые источники — компактные яркие радиоисточники.

Таким объектом могла быть Крабовидная туманность — остаток вспышки сверхновой 1054 г. Оптическое излучение релятивистских электронов много меньше времени ее жизни. Одна из центральных звездочек могла быть источником быстрых частиц. Чтобы его обнаружить, нужен инструмент с высоким угловым разрешением. Для этого мы использовали Луну. При приближении края Луны к "точечному" источнику возникает дифракционная картинка. Эти события происходили в 1964 г., в том числе на ЦДКС. Этим наблюдениям придавалось огромное значение. По указанию М.В. Келдыша были остановлены сеансы связи с "Венерой" и проведены наблюдения покрытий. На волне 32 см была обнаружена дифракционная картинка — компактный радиоисточник (нейтронная звезда), а в юго-восточ-

ной части туманности — область переменного радиоизлучения, природа которой оставалась загадкой. Был также обнаружен компактный объект в радиоисточнике 3С 273 — знаменитый квазар.

Открытие источников релятивистских частиц неизбежно ставило вопрос о переменности радиоизлучения. Г.Б. Шоломицкий обратил внимание на возможную переменность объекта СТА102. Как и для Крабовидной туманности, результат был неожиданным и породил весьма экзотические объяснения. Анализ данных многолетних наблюдений разных обсерваторий подтвердил переменность радиоизлучения объектов.

МЕТОД РСДБ

Возможности методов покрытий ограничены. Далеко не все радиоисточники покрываются и видны в местах расположения больших радиотелескопов. Да и угловое разрешение оказалось недостаточным для измерений структуры компактных источников.

Весной 1962 г. на ЦДКС мы с Г.Я. Гуськовым обсуждали вопрос о снижении эффективности антенн АДУ-1000. Была установлена причина — конденсация водяного пара в волноводах. В ходе обсуждения возникла дискуссия о длинноволновых доплеровских измерениях координат космических аппаратов. Эти измерения осуществлялись путем преобразования принятых сигналов

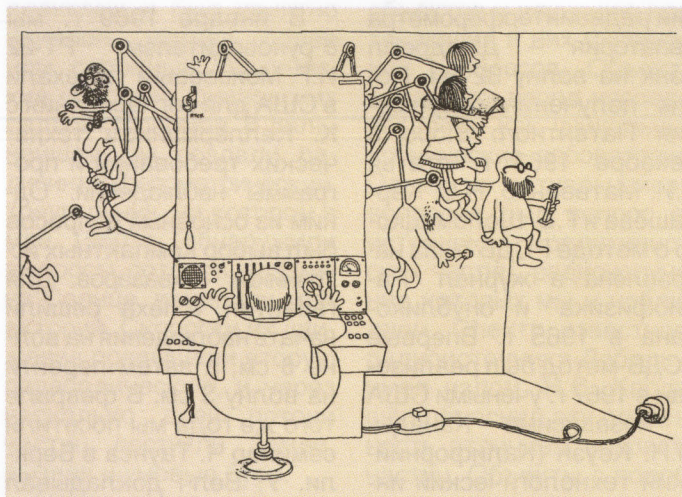
на пунктах приема с помощью атомных стандартов частоты, регистрацией их на магнитофонах и последующем выделении разностной частоты в центре обработки. На этом принципе может работать и интерферометр, но в этом случае нужно измерить не разность частот, а разность фаз сигналов. Когерентность преобразованных сигналов при их записи и воспроизведении можно сохранить с помощью регистрации пилот-сигналов. Таким образом, элементы интерферометра физически не связаны между собой и могут быть разнесены на сколь угодно большое расстояние. Пределы Земли не являются ограничением — один из элементов интерферометра может быть вынесен за ее пределы. Для испытаний Г.Я. Гуськов предложил использовать АДУ-1000 и 32-м антенну, расположенную вблизи Симферополя. Осенью этого же года автор изложил идею РСДБ на семинаре Радиоастрономической лаборатории ФИАН, но не получил поддержки, а через несколько дней семинар в ГАИШ рекомендовал запатентовать метод. В декабре 1962 г. заявка направляется в Патентное Бюро.

Летом 1963 г. гость М.В. Келдыша Б. Ловелл, директор радиообсерватории Джодрелл Бэнк посетил ЦДКС. Автор обсудил с ним метод РСДБ. Он оценил идею, но высказал сомнение в необходимости сверхвысоких угловых разрешений. Был согласован меморандум о созда-

нии радиоинтерферометра Евпатория — Джодрелл Бэнк на волну 32 см. После получения разрешения Патентного Бюро в декабре 1963 г. статья Л.И. Матвеевко, Н.С. Кардашёва и Г.Б. Шоломицкого о методе РСДБ была направлена в журнал "Радиофизика" и опубликована в 1965 г. Впервые РСДБ-метод был реализован в 1967 г. учеными США и независимо Канады. М.Н. Коуэн (Калифорнийский технологический институт) и К.И. Келлерманн (Национальная радиоастрономическая обсерватория, США) после завершения эксперимента обратились к В.В. Виткевичу (ФИАН) с предложением провести наблюдения между 22-м антенной в Пушкино и 43-м в Грин Бэнк на волне 3 см. Практически это предложение американских коллег и явилось тем толчком, с которого начались у нас в стране работы по РСДБ. Это было время "холодной" войны. И только благодаря поддержке Н.Г. Басова и Д.В. Скобельцина эксперимент состоялся. После согласования с директивными органами и А.Б. Северным мы сообщили американской стороне о возможности РСДБ-наблюдений на РТ-22 в Симеизе. Срочно подготавливаем аппаратуру и начинаем испытания антенны на волне 3 см. Одновременно в район Прибалтики направляется группа специалистов для исследования возможности приема сигналов навигационной системы "Лоран С" для синхронизации времени.

В январе 1969 г. мы с руководителем РТ-22 И.Г. Моисеевым выехали в США для согласования с К. Келлерманном технических требований и программы наблюдений. Одним из основных вопросов был выбор компактных источников — квазаров. Для гарантии успеха решили начать наблюдения на волне 6 см, а затем перейти на волну 3 см. В феврале того же года мы посетили семинар Ч. Таунса в Беркли. У. Велч докладывал об обнаружении в ряде газопылевых туманностей источников, излучающих линии водяного пара на волне 1.35 см. Их природа была не ясна, но с технической точки зрения это были лучшие кандидаты для РСДБ-измерений: узкий спектр и необычайно большие потоки излучения. Мы обсудили возможность наблюдений на радиоинтерферометре СССР—США, а затем продолжили обсуждение с Б. Берком в Массачуссетском технологическом институте. Были согласованы параметры аппаратуры и 37-м радиотелескопа в Хайстеке. Испытания аппаратуры и методики наблюдений целесообразно было провести в пределах США, а затем перейти на межконтинентальную базу Симеиз—Хайстек.

Опустим детали становления и развития РСДБ у нас в стране, порой они носили драматический характер, что типично для науки. Отметим только, что "бюрократические" проблемы в те годы решались весьма оперативно,



чего не скажешь о "научных". Новое направление требовало принципиально новых форм организации работ. Блок-схема РСДБ показана в дружеском шарже. Лаборатория Радиоастрономии ФИАН не располагала необходимыми возможностями. Г.И. Петров обращается в ФИАН с предложением создать в Институте космических исследований лабораторию РСДБ, и в июне 1969 г. Д.В. Скобельцин и И.Г. Басов принимают решение о передаче РСДБ направления в ИКИ. Одной из задач лаборатории было создание интерферометра Земля-Луна на волне 18 см.

Осенью 1969 г. К. Келлерманн, Б. Кларк и Д. Пайн приезжают в Крым, и начинается установка приемников и системы регистрации МК-1. Для синхронизации времени элементов интерферометра из Грин Бэнк был доставлен в горячем состоянии рубидиевый стандарт частоты (атомные часы). После подзарядки аккумуляторов в Москве часы прибыли

ли в Симферополь. Машина ждала у трапа самолета и немедленно выехала в Симеиз. Не доезжая до Никитского ботанического сада, нас остановил автоинспектор за превышение скорости. Он проникся важностью момента и из любопытства попросил показать эти диковинные атомные часы. Открываем багажник — часы стоят! На циферблате — время пролета над Харьковом. Аккумулятор был недозаряжен. Срочно запросили помощь О. Ридбека из Космической радиообсерватории (Швеция). К. Келлерманн с Л. Коганом вылетели в Ленинград с часами и дополнительным аккумулятором навстречу. Часы сличили и шведские оставили для хранения времени в Пулковской обсерватории, а первые вернули в Крым. РСДБ-наблюдения начались. Магнитные ленты с тестовыми записями сигналов были отправлены в НРАО для обработки. Через несколько дней были получены интерференционные сигналы, уточнены

Блок-схема РСДБ. Дружеский шарж И. Максимова, метко выразивший суть процесса РСДБ наблюдений.

параметры базы и поправки времени. В октябре успешно прошли наблюдения на обеих волнах. Обработка данных проводилась независимо на самых мощных ЭВМ в НРАО, Калифорнийском технологическом институте и Центре космических полетов им. Р. Годдарда (GSFC). На волне 2.8 см были получены радиоинтерференционные сигналы от источников 3С 273 и 4С 39.25. Таким образом была доказана возможность реализации РСДБ на сантиметровых волнах, достигнуто предельное в условиях Земли угловое разрешение 0.0005". Оказалось, что квазары имеют сложную структуру. В этой связи были необходимы наблюдения на радиоинтерферометрах с базами разной длины и ориентации.

Очередной эксперимент проводится в июне 1971 г. на $\lambda = 3.5$ см с дополнительной 64-м антенной DSN в Голдстоуне (Калифорния). Антенны образуют три интерферометра. Для повышения чувствительности на РТ-22 устанавливают малошумящий усилитель мазерного типа и каскадную систему облучения антенны. Для повышения кратковременной стабильности гетеродина М. Коуэн и Б. Кларк привозят специальный кварцевый генератор, стабилизированный рубидиевым стандартом. В

а) К. Келлерманн (НРАО) включает запись сигнала квазара 3С 273 на РТ-22, первый эксперимент Симеиз-Грин Бэнк на волне 6 см, 1969 г.

б) М. Коуэн (Калифорнийский технологический институт), Б. Кларк (Национальная радиоастрономическая обсерватория, США) и И.Г. Моисеев (КРАО). Слева — радиотелескоп РТ-22 Крымской астрофизической обсерватории (Кацивели). Эксперимент Симеиз-Грин Бэнк-Голдстоун на волне 3.55 см, 1971 г.



Грин Бэнк и Голдстоуне применяют стандарты частоты водородного типа. НРАО разрабатывает широкополосную систему регистрации МК-2. Результаты наблюдений уточнили структуру ядер квазаров, установили необычайно высокие яркостные температуры ядер, достигающие 10^{12} К. Были обнаружены выбросы компонентов, движущиеся со сверхсветовыми скоростями.

После квазаров перешли к наблюдениям H_2O объектов на радиоинтерферометре Крым-Хайстек с предельным угловым разрешением, достигающим 0.1 мс дуги. Предварительные наблюдения в пределах США показали, что излучение в линиях определяется яркими компактными областями. В Крым прибыли Б. Берк, Д. Моран и К. Папа (Массачусетский технологический ин-

ститут) и С. Ноулс (Военно-морская исследовательская лаборатория, США). В объекте W 49 была обнаружена мощная вспышка. Нарастание излучения произошло за время порядка нескольких минут, что свидетельствовало об очень малых размерах области. РСДБ-измерения подтвердили это, размеры не превышали 0.07 а.е. Яркостная температура вспышки достигала 10^{16} К и соответ-



ствовала H_2O мазерному излучению. Открытие H_2O мазерных источников подтвердило необходимость создания космического интерферометра.

ГЛОБАЛЬНАЯ РСДБ-СЕТЬ

Полученные результаты доказали возможность реализации РСДБ практически во всем спектре радиоволн. Обнаружены яркие компактные объекты, установлена их природа, определены направления исследований и оптимальные параметры наблюдений. В наблюдения включается все большее число радиотелескопов: 64-м Тидбинбилла и 26-м в Мериленд Поинт; 10-м в Бангалоре и 20-м в Онсала, 42-м в Овенс Вэлли и 76-м в

Джодрелл Бэнк, 22-м в Пуцино. Вводятся в действие уникальный 100-м радиотелескоп в Эффелсберге и 32-м инструменты в Италии. Созданию глобальной РСДБ-сети способствовала разработка Дж. Йеном простой, надежной системы регистрации МК-2 на основе серийного видеоманитофона. В США и Германии были созданы специализированные вычислительные центры обработки РСДБ-данных. Радиотелескопы оснащаются малошумящими усилителями, водородными стандартами частоты. Практически все радиотелескопы мира объединяются в единую глобальную сеть. Наблюдения проводятся во всем спектре радиоволн от миллиме-

С. Ноулс (Военно-морская исследовательская лаборатория США), Д. Джонси и Н. Фоурикс (Министерство науки и технологий, Австралия), В.И. Костенко (ИКИ РАН). 64-м радиотелескоп DSN, Тидбинбилла (Австралия). Первый глобальный эксперимент Тидбинбилла–Симеиз–Мэриленд Поинт, 1974 г. Исследованы H_2O мазерные источники с предельным угловым разрешением.

тровых до метровых включительно. Накопленный опыт позволил НРАО создать уникальную РСДБ-систему VLBA, состоящую из десяти 25-м антенн.

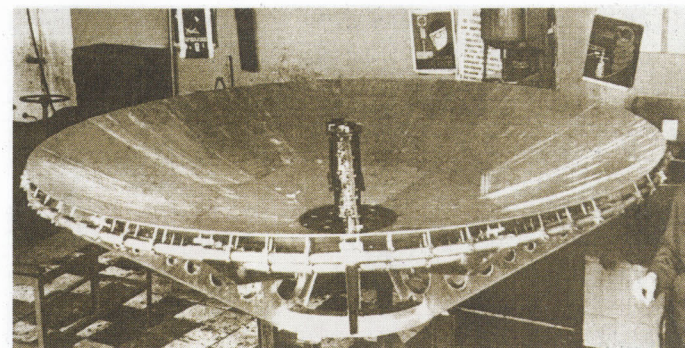
КОСМИЧЕСКИЙ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТР

Угловое разрешение РСДБ определяется размерами базы, которая может быть сделана сколь угодно большой. Но имеется ряд ограничивающих факторов. Неоднородности в ионосфере, межпланетной и межзвездной средах рассеивают проходящее радиоизлучение, увеличивая видимые размеры источника пропорционально квадрату длины волны. В этой связи на метровых-дециметровых волнах размеры баз не выходят за пределы Земли. С другой стороны, ядра квазаров окружены плотной ионизированной средой, которая поглощает излучение на низких частотах, но становится прозрачной на высоких.

Сразу же после обнаружения ярких компактных H_2O мазерных источников Лаборатория РСДБ ИКИ приступила к разработке космического радиointерферометра на волну 1.35 см с апогеем орбиты

Параболическое зеркало космического радиотелескопа КРТ-3 диаметром 3.1 м.

20 тыс. км и перигеом 300 км. Угловое разрешение достигает десятков микросекунд. Руководитель проекта – В.П. Мишин, научный – Л.И. Матвеевко и технический – В.И. Костенко. Отражающая поверхность параболического зеркала космического радиотелескопа диаметром 3.1 м закреплена на тонких инваровых стержнях, что обеспечивало работу в условиях космоса, включая ИК-диапазон. Создавалась глобальная наземная сеть, проводились исследования мазерных источников, отрабатывалась методика измерений, определялись оптимальные параметры системы. Проект получил широкую международную поддержку. Но неумолимо приближалась “перестройка”, которая внесла свои коррективы. Наши разработки нашли свое отражение в японском проекте VSOP (VLBI Space Observatory Programme), реализованном в 1997 г. Этот эксперимент подтвердил оптимальный выбор параметров и заложил технологическую и методическую основу интерферометров Земля–космос. В нашей стране, несмотря на трудности, продолжаются работы по созданию следующего поколения космического радиointерферометра с 10-м космическим радиотелескопом – проект “Радиоастрон”, руководитель Н.С. Кардашев (Земля и Вселенная, 2000, № 4).



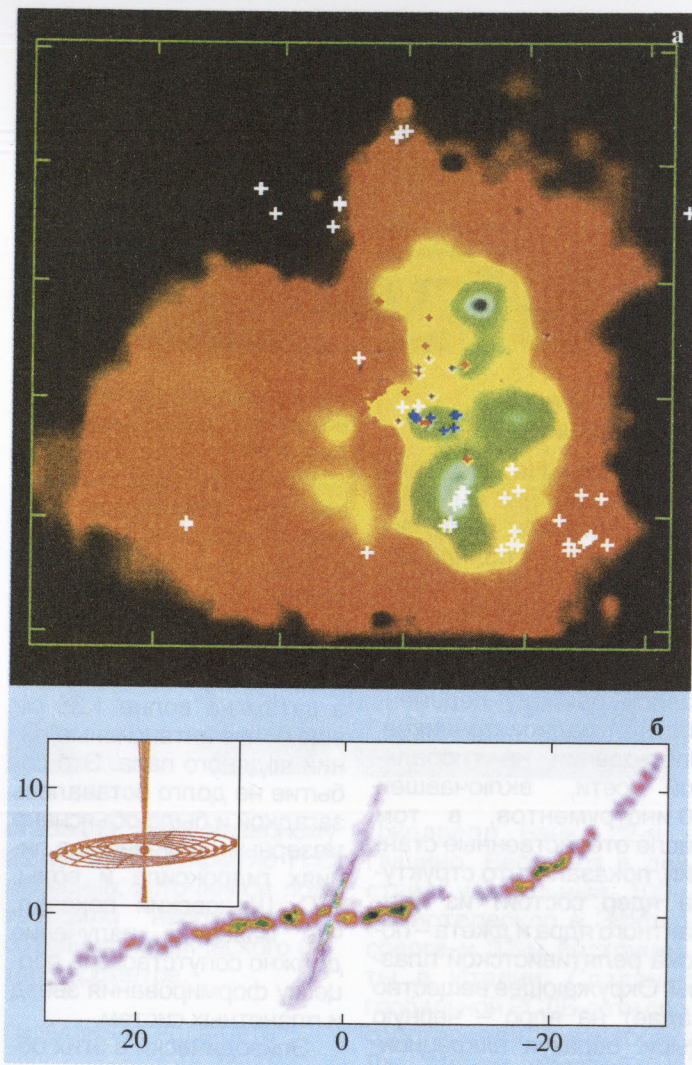
РЕЗУЛЬТАТЫ РСДБ-ИССЛЕДОВАНИЙ

Квазары. Не так давно окружающий нас мир воспринимался как нечто застывшее. Это в полной мере относилось и к основным объектам Вселенной – галактикам и их ядрам. РСДБ-исследования установили природу переменности радиоисточников. Наблюдения на глобальной сети, включавшей 20 инструментов, в том числе отечественные станции, показали, что структура ядер состоит из компактного ядра и джета – потока релятивистской плазмы. Окружающее вещество падает на ядро – черную дыру, образуя аккреционный диск. Огромная гравитационная энергия черной дыры трансформируется в поток релятивистской плазмы, выбрасываемый с околосветовой скоростью. Плотные вкрапления определяют вспышки радиоизлучения. Температура плазмы достигает 10^{12} К. Поток возбуждает магнитное поле, фокусирующее его в тонкую струю. Окружающая тепловая плазма обволакивает поток подобно стенке кокона и закрывает ядро на низких частотах. Прецессия

оси вращения системы приводит к образованию спиральной структуры джета.

Области образования звезд и планетных систем. В середине 1960-х гг. в ряде туманностей на волне 18 см обнаружили необычайно интенсивные узкие линии неизвестного вещества – “мистериума”, а затем на волне 1.35 см еще более интенсивные линии водяного пара. Это событие не долго оставалось загадкой и было объяснено мазерным излучением в линиях гидроксила и воды. И.С. Шкловский показал, что мазерное излучение должно сопутствовать процессу формирования звезд и планетных систем.

Эпизодически в этих областях происходят мощные вспышки H_2O мазерного излучения. Впервые такие вспышки наблюдались в объекте W49 и туманности Ориона. Газопылевой комплекс Ориона – уникальная космическая лаборатория, в которой протекают физико-химические процессы, сопровождаемые образованием молекул, в том числе воды и многих сложных органических соединений. В результате гравитационной неустойчивости в ней образуются уплотнения – активные



Туманность Ориона: а) инфракрасное изображение (белым, крестиками отмечены H_2O мазерные источники, синими — красными — OH мазерные источники); б) структура области H_2O супермазерного излучения, угловое разрешение — 0.1 мс, или 0.05 а.е. В левом верхнем углу показана модель структуры этой области.

500 пк. И, как образно выразился И.С. Шкловский "мазерное излучение, подобно крику ребенка, объявило об этом".

Прикладные задачи
РСДБ широко используется для решения прикладных задач. Одним из первых применений РСДБ было измерение передвижения астронавтов по лунной поверхности (программа "Аполлон", 1971–1972 гг.). Точность определения положения "Ровера" относительно лунного модуля достигала 20 см.

В 1974 г. мы предложили применить РСДБ для исследований динамики атмосферы Венеры — проект "ВЕГА". Предстояло сбросить аэростатный зонд на Венеру и измерить траекторию его движения на расстоянии 100 млн. км, причем мощность бортового передатчика не превышала 1 Вт. Частота передатчика была принята равной линии излучения OH мазерных источников. Эти источники являлись естественными имитаторами сигнала борта. На волне 18 см работала глобальная РСДБ-сеть. Она была дополнена отечественными антеннами: 70-м в Уссурийске и Евпатории, 64-м в Медвежьих Озерах, 25-м в Улан-Удэ, 22-м в Симеизе и Пущино. Большую по-

70-м антенна ЦДКС (Евпатория).
мощь по созданию отечественных элементов сети оказали Е.П. Велихов, А.М. Прохоров и Р.З. Сагдеев. К моменту запуска была завершена юстировка сети. На нижнем рисунке показан комплекс обработки данных. Интерференционные лепестки от мазерного источника W3 OH (на врезке) получены на радиоинтерферометре Уссурийск–Евпатория.

Аэростаты АМС "ВЕГА-1 и 2" были сброшены в атмосферу Венеры 11 и 15 июня 1985 г. и наблюдались в течение 46 ч. Они свободно плыли на высоте около 53 км со скоростью 69 и 67 м/с параллельно экватору. При приближении к горному массиву Афродиты восходящий поток отклонил аэростат "ВЕГА-2" к северу на 1.1 км.

ПЕРСПЕКТИВЫ РСДБ

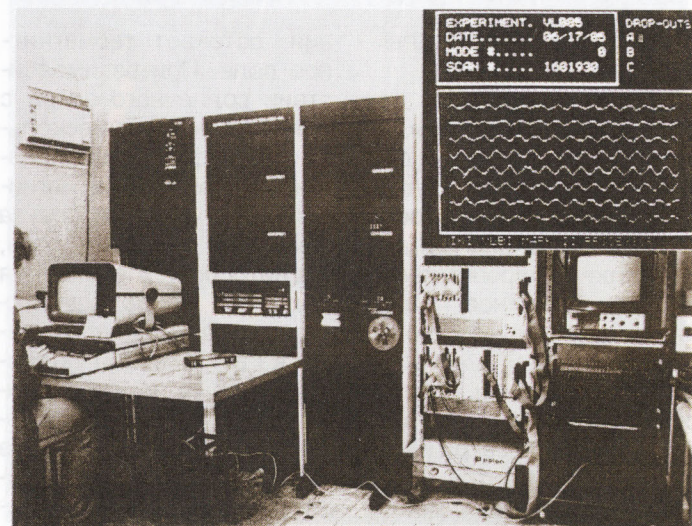
В последние годы произошел огромный прогресс в полупроводниковой технике и технологии. Разработаны и стали доступны мощные надежные вычислительные устройства, созданы широкополосные системы регистрации и обработки данных, высокочувствительные широкополосные усилители достигли миллиметровых волн. Внедряются широкополосные оптоволоконные системы передачи сигналов. Недалек день, когда РСДБ-сеть Восточного по-

Комплекс корреляционной обработки РСДБ-данных.



лушария начнет работать с предельной чувствительностью и угловым разрешением в реальном времени. Освоение миллиметрового диапазона открывает широкие возможности для исследований ядер квазаров и областей звезд-

дообразования с микросекундным разрешением, в том числе в поляризованном излучении и широком спектре молекулярных линий. Дальнейшее развитие РСДБ связано с выводом на орбиту крупных радиотелескопов.



зоны. В сентябре 1979 г. в одной из зон высокой активности были обнаружены вспышки H_2O мазерного излучения, которые наблюдались до конца 1987 г. Наши исследования показали, что они связаны с тонкой вытянутой структурой длиной около 30 а.е., в которую вкраплены яркие компактные источники. Их размеры не превышают 0.05 а.е., а яркости достигают 10^{16} К. Наблюдаемая высокоорганизованная структура со-

ответствует аккреционному диску на стадии разделения на протопланетные кольца, наблюдаемые с ребра. Плоскость диска искривлена подобно полям шляпы. В центральной части наблюдаются биполярные потоки вещества. Окружающая оболочка усиливает более чем на два порядка излучение структуры. Только РСДБ могла открыть этот удивительный мир рождения звезд и планетных систем, удаленных от нас на расстояние

Магнитный щит Земли

С.П. САВИН,
доктор физико-математических наук
Институт космических исследований РАН

Магнитное поле – надежная защита Земли от корпускулярного излучения Солнца. “Прорыв” плазмой в областях минимального магнитного поля (“плазменных брешах”) для земной атмосферы не катастрофичен. В процессах, протекающих в околоземном космическом пространстве, особенно интересно, самоорганизация плазменного ламинарного потока.



сферы не катастрофичен. В процессах, протекающих в околоземном космическом пространстве, особенно интересно, самоорганизация плазменного ламинарного потока.

СВОЙСТВА МАГНИТОСФЕРЫ

Солнечный ветер, или потоки горячей плазмы, непрерывно истекая со скоростью около 500 км/с из солнечной короны, достигает Земли за два-три дня. Он встречает препятствие – земное магнитное поле и образует ударную волну на расстоянии 8×10^4 км от нашей планеты. При прохождении через нее плазма солнечного ветра нагревается, тормозится и, меняя направление движе-

ния, обтекает геомагнитное поле. При взаимодействии солнечного ветра с полем возникают несколько специфических плазменных областей в магнитосфере: *магнитопауза* (граница магнитосферы), *магнитослой* (переходная область), *хвост магнитосферы*, *плазмосфера* в виде каплеобразной полости, *дневные полярные каспы* (лат. *cusp* – рога) и *авроральная зона*. В хвосте магнитосферы (простирается на миллионы кило-

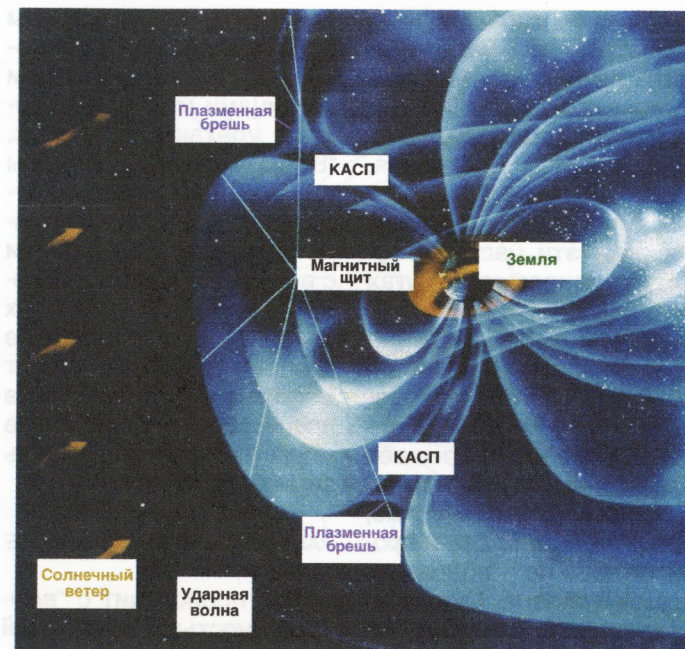
метров с ночной стороны планеты) запасается магнитная энергия, впоследствии она высвобождается в виде ускоренных частиц и мощных электрических токов, воздействующих на ионосферу и вызывающих магнитные бури и суббури. При ускорении плазмы в хвосте магнитосферы часть ее выпадает в ионосферу (особенно во время суббурь), производя полярные сияния. В ионосферу втекают сильные электрические токи

Магнитосфера Земли.

достигающие миллионов ампер и создающие в ней интенсивные токовые системы, излучения радиоволн и пучки ускоренных частиц.

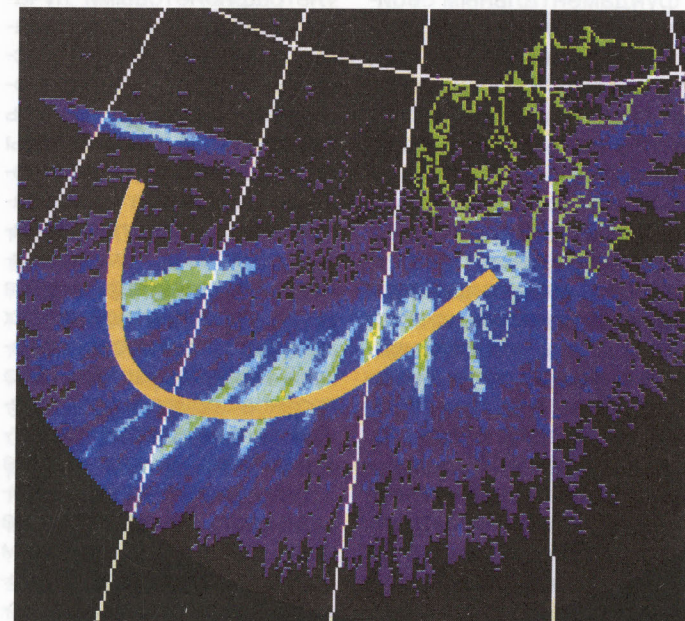
Во многом благодаря мощной магнитосфере, простирающейся на 60 тыс. км навстречу корпускулярному излучению Солнца (солнечному ветру) и в десятки раз дальше в противоположную сторону, наша планета не превратилась в марсианскую пустыню. Солнечный ветер непрерывно испускается Солнцем, его динамическое давление составляет всего-то 2 нП, что в триллионы раз меньше давления атмосферы у поверхности Земли (Земля и Вселенная, 1968, № 5; 1979, № 4; 1997, № 6; 1999, № 5). Атмосфера нашей планеты гораздо плотнее марсианской из-за наличия магнитного поля. Отсутствие магнитосферы у Марса – основная причина того, что

он почти потерял свою воздушную оболочку. Это в значительной степени обусловлено тем, что солнечные протоны ионизовали и, главное, увлекали верхнюю атмосферу Красной планеты в межпланетную среду. Земля же почти потеряла свою воздушную оболочку. Это в значительной степени обусловлено тем, что солнечные протоны ионизовали и, главное, увлекали верхнюю атмосферу Красной планеты в межпланетную среду.



нетную бездну. Хотя гравитация Земли значительно больше марсианской, на нашей планете не сохранились бы атмосфера и океаны без магнитно-

го щита. Вопрос его надежности и особенно образования в нем плазменных “брешей” очень важен для существования жизни на Земле!



Обычно в магнитосферу, несмотря на магнитный щит, проникают частицы солнечного ветра. Это они вызывают *полярные сияния* (Земля и Вселенная, 1965, № 6; 1998, № 3). После блужданий по магнитосфере эти частицы ионизуют ионосферу в дугах полярных сияний в ночные часы даже над Москвой (Земля и Вселенная, 2004, № 5). Во время дневных полярных сияний солнечная плазма прорывает магнитный щит в его самом слабом месте. К счастью, магнитный щит хоть и пробивается, но "подрезает крылья" плазме. Она теряет скорость, и теперь ослабленные щитом ионы едва обнаруживаются самыми чувствительными приборами. Их захватывает земное магнитное поле, давление которого в ионосфере в 10^7 раз превосходит напор ионов. Отсутствие существенных потерь в атмосфере связано с фундаментальным свойством плазмы — ее **диамагнетизмом**. Это значит, что плазма "вмораживает" (захватывается) в магнитное поле: ионы и электроны начинают вращаться вокруг силовых линий поля навстречу друг другу. С приближением "чужого" внешнего магнитного поля траектории частиц искажаются, чтобы компенсировать внешнее поле, вновь создаваемое внутри плазмы. Если солнечный ветер соприкасается непосредственно с верхней ионосферой (как на Марсе), образующиеся за счет солнечного ультрафиолета ионосферные ионы ув-

лекаются его магнитным полем, а при их столкновениях с нейтральными частицами молекулы воздуха улетают в космос. "Вмороженность" плазмы в собственное поле нарушается при столкновениях ионов друг с другом или с волнами в магнитном поле, в результате которых изменяется регулярное вращение частиц вокруг магнитного поля. Такие процессы в магнитосфере могут медленно разрушать земную атмосферу.

РАБОТА ПЛАЗМЫ В КОСМОСЕ

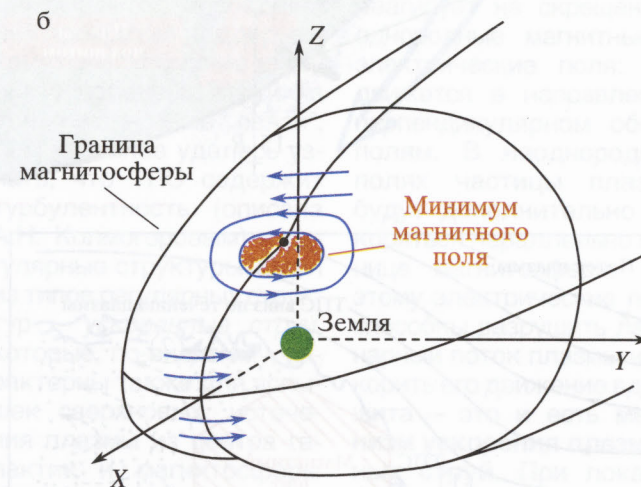
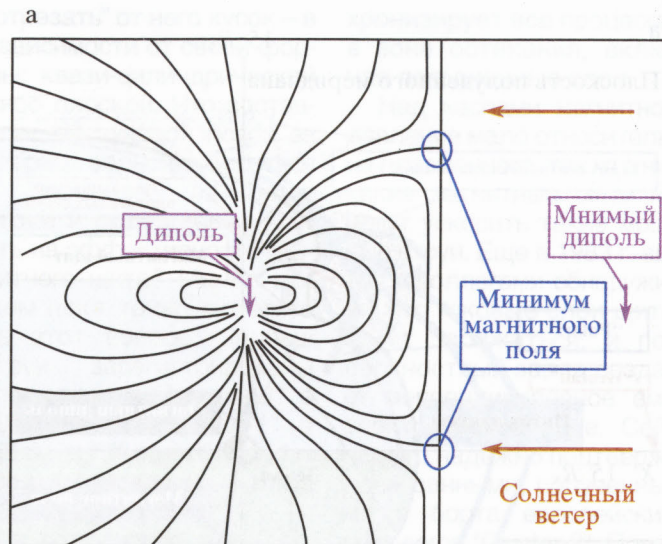
Что происходит с "вмороженностью" солнечной плазмы, и как она все-таки устремляется в атмосферу вдоль магнитного поля в отсутствие столкновений ионов друг с другом в магнитосфере? Навстречу солнечной плазме из магнитосферы движется плазма, образованная в верхней ионосфере солнечными ультрафиолетовыми лучами и энергичными частицами полярных сияний. Исследованием солнечно-земных связей занимались теоретики и специалисты по численному моделированию плазмы, а также запускались десятки научных спутников. "Вмороженность" плазмы нарушается из-за малопонятной до сих пор турбулентности, похожей на воздушную. Это грозное природное явление сильно влияет на магнитосферу, а, как многие знают, атмосферная турбулентность разрушила не один самолет. Советским ученым случалось "укрощать" стихию, создавая ис-

кусственный турбулентный пограничный слой (с магнитосферой: а) столкновение потоков солнечного ветра с магнитным полем Земли (С. Чепмен и В. Ферраро, 1931); б) "прорыв" плазмы внутрь магнитного щита (магнитопаузы; стрелками показаны токи на поверхности щита).

Турбулентный пограничный слой (ТПС) обна-

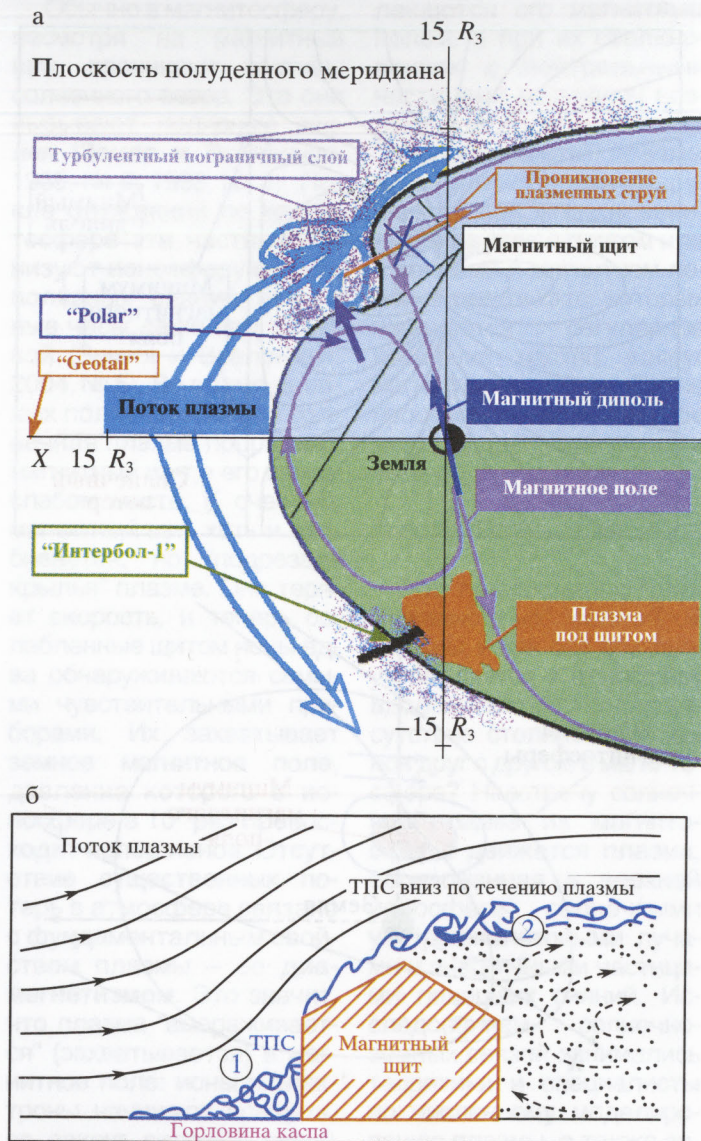
ружен и на границе высокоширотной магнитосферы (на краю магнитного щита). Чтобы понять, как образуется турбулентность в магнитосфере, надо совершить экскурс в историю исследования магнитного щита. Начнем с простой модели, воспроизводящей условия на границе между солнечной плазмой и магнитным полем Земли. Первая модель возникла в конце XIX в., когда стало ясно, что нашу планету омывает поток плазмы. **Геомагнитный диполь** (земной магнит) представляет собой препятствие для солнечной плазмы. Ученые С. Чепмен и Дж. Бартел (США), В. Ферраро (Италия) в 1931 г. одними из первых построили наглядную физическую модель взаимодействия плазмы "чужим" полем: на оси симметрии Солнце—Земля для наглядности представили давление плазмы, деформируемое давлением деформированного магнитного поля. В результате действия потока на магнитосферу моделировалось магнитное поле, или искусственным, диполем (что неплохо воспроизводило действительные токи на границе солнечной плазмы). Подобная модель взаимодействия солнечного ветра и магнитосферы оказывалась продуктивной в двух аспектах. Это, во-первых, разделение поля диполя на дневное, деформированное внешним напором, и ночное — вытянутое далеко от Солнца, и, во-вторых, — локализация минимумов поля на границе — в сторону светила над полюсами геомагнитного диполя. Впоследствии эти области были названы полярными каспами (Земля и Вселенная, 1992, № 6), которые и обеспечивают основной приток солнечной плазмы в магнитосферу.

Исследователи пришли к выводу, что области минимума магнитного давления на границе магнитосферы, скорее всего, выглядят как воронка. Одну из самых ранних и простых физических моделей этой области магнитного щита разработали в 1965 г. советские ученые **В.Д. Плетнев, Г.А. Скуридин, В.П. Шалимов и И.Н. Швачунов**, первыми предсказав "прорыв" солнечной плазмы внутрь магнитосферы (Земля и Вселенная, 1965, № 3, 4). Они установили, что частицы изнутри магнитосферной ловушки будут теряться сквозь касп (подобно тому, как внешние заряженные частицы про-



никают сквозь него), что важно для удержания плазмы в лабораторных и, надеемся, когда-нибудь в промышленных термоядерных реакторах для выработки электроэнергии. В статье приведены примеры несимметричного затекания лабораторной плазмы в дипольное магнитное поле: при наклоне диполя в сторону источника плазмы заполняется только

1 касп. В конце XX в. подобная асимметрия была открыта заново благодаря данным, полученным одновременно с научных спутников "Интербол-1" (Россия), "Polar" (США) и "Geotail" (Япония). Для совместной интерпретации экспериментов на этих спутниках использовалось численное моделирование обтекания магнитосферы потоком плазмы,



что позволило сравнить параметры в разных точках пространства на расстоянии более 10^5 км. В режиме "реального времени" были рассчитаны параметры плазмы и магнитного поля во всей зоне возмущенного потока между головной ударной волной и магнитопаузой — магнит-

ным щитом, чтобы сопоставить измерения спутников в разных областях. Если поток обтекает касп, имеющий форму ступеньки, то перед ним образуются застойная зона и турбулентный пограничный слой. Наши специалисты, основываясь на первых результатах ИСЗ "Интербол-1", при-

Процессы в космической плазме: а) взаимодействие потока солнечной плазмы с магнитным щитом в плоскости меридиана (полдень-полночь), по данным ИСЗ "Интербол-1": синие стрелки — поток солнечной плазмы, показаны участки орбит спутников "Polar" (вверху) и "Интербол-1" (внизу), а также положение ИСЗ "Geotail" в солнечном ветре перед головной ударной волной (турбулентный пограничный слой обозначен точками); б) образование пограничного слоя при взаимодействии потока плазмы с локальными неоднородностями магнитного щита (Г. Хаерендел, 1978): перед локальным препятствием в форме ступеньки (1) и позади него (2)

шли к выводу, вслед за немецким ученым Г. Хаеренделом (1978), что магнитный щит над каспами регулярно продавливаются угаснет Солнце, если, кося набегающим потоком солнечного ветра. Тради-

ционная точка зрения: каплеобразная полость с осью вращения, направленная на Солнце, хорошо описывает форму магнитного щита. Истина оказалась сложнее: когда ось магнитного диполя была направлена от Солнца, модель данных "Интербола-1" однозначно указывали на присутствие внутри него застойной солнечной плазмы. Причем набегающую плазму и внутренний пограничный слой вместо регулярной границы разделяла зона турбулентности. Чтобы проверить, действительно ли турбулентность может отразить набегающий поток при малом давлении магнитного поля, мы обратились к коллегам из Италии, Грузии

США с просьбой провести численное моделирование турбулентного токового слоя, используя измеренные нами спектры мощностных колебаний. Моделирование подтвердило, что около 80% набегающих ионов отражаются колебаниями, 10% ионов проникают сквозь турбулентный щит, обеспечивая "прорыв" солнечной плазмы внутрь магнитосферы и утечку ионосферной плазмы наружу. Хорошо, что утечка оказалась на несколько порядков меньше потерь атмосферы при прямом взаимодействии плазмы с ионосферой, иначе воздушная оболочка Земли давно бы улетучилась.

Ничего не должно измениться еще в течение нескольких миллиардов лет, пока не регулярно продавливаются угаснет Солнце, если, кося набегающим потоком солнечного ветра. Тради-

ционная точка зрения: каплеобразная полость с осью вращения, направленная на Солнце, хорошо описывает форму магнитного щита. Истина оказалась сложнее: когда ось магнитного диполя была направлена от Солнца, модель данных "Интербола-1" однозначно указывали на присутствие внутри него застойной солнечной плазмы. Причем набегающую плазму и внутренний пограничный слой вместо регулярной границы разделяла зона турбулентности. Чтобы проверить, действительно ли турбулентность может отразить набегающий поток при малом давлении магнитного поля, мы обратились к коллегам из Италии, Грузии

"отрезать" от него кусок — в зависимости от своей формы: квази-цилиндрической либо плоской. Что заставляет дозвуковой поток за ударной волной собираться в мощные звуковые струи и существенно влиять на эффективность магнитного щита? Мы не можем пока точно ответить на этот вопрос. Данные струи зарегистрированы спутниками "Прогноз-8" в 1981 г., "Интербол-1" в 1998 г. и "Cluster-2" в 2001 г. (Земля и Вселенная, 1997, № 3; 2001, № 5).

К сожалению, в 2005 г. Российский фонд фундаментальных исследований прекратил поддержку тематики "Изучение влияния ускоренных струй на солнечно-земные связи". Тем не менее удалось узнать, что ТПС содержит турбулентность (описана А.Н. Колмогоровым) и регулярные структуры. Один из типов регулярных структур — ускоренные струи, которые, по-видимому, характерны также для вспышек сверхновых, истечения плазмы из центра галактик и магнитосферы Юпитера, то есть имеют универсальную природу. Другой тип регулярного поведения ТПС — модуляция турбулентных процессов более низкочастотными волнами между ударной волной и магнитным щитом (волн совместного сжатия и разряжения плазмы, магнитного поля). Это своеобразный плазменный "свисток" шириной около 10^5 км и длиной до 10^6 км с собственной резонансной частотой в несколько миллигерц. Такой "свисток" син-

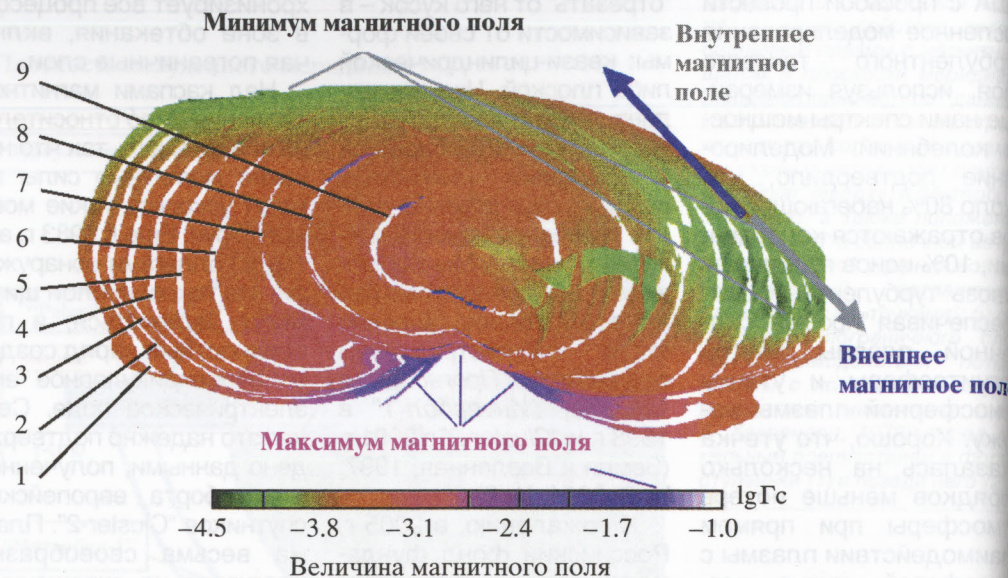
хронизирует все процессы в зоне обтекания, включая пограничные слои.

Над каспами магнитное давление мало относительно плазменного, так что никакие магнитные силы не могут ускорить такие мощные струи. Еще в 1983 г. автор с коллегами обнаружили, что токовые слои щита могут заряжаться, и поверхностный заряд создает перпендикулярное ему электрическое поле. Сейчас это надежно подтверждено данными, полученными с борта европейских спутников "Cluster-2". Плазма весьма своеобразно реагирует на скрещенные однородные магнитные и электрические поля: она движется в направлении, перпендикулярном обоим полям. В неоднородных полях частицы плазмы будут дополнительно ускоряться параллельно границе магнитосферы. Поэтому электрические поля способны разрушить ламинарный поток плазмы и ускорить его движение вдоль щита — это и есть механизм ускорения плазменных струй. При локальной форме магнитного щита в виде ступеньки ускоренные струи "проткнут" его. Это проникновение струй внутрь магнитного щита не приводит к существенным потерям атмосферы, поскольку происходит на краю щита — в десятках тысяч километров от атмосферы.

Характерные формы дневной границы магнитного щита получил в 2004 г.

МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Характерные формы дневной границы магнитного щита получил в 2004 г.



американский ученый Н. Мэйнард при магнитогеодинамическом моделировании на суперкомпьютере, хорошо описывающем изменение параметров вне и внутри щита, но не на границе. Проблема связана с толщиной границы, сравнимой с размером ячейки пространственной сетки численного счета: при моделировании возникает эффект искусственной дискретной проводимости, так не достояющей физике бесстолкновительной плазмы! Увы, даже суперкомпьютер дает только крупно- и среднemasштабную структуру и динамику областей обтекания магнитного щита.

Итак, численное моделирование подтверждает качественную модель В.Д. Плетнева и соавторов (1965). В представленном нами случае ось магнитного диполя в нижней части магнитного щита поверну-

та на 23° в сторону Солнца, с учетом чего моделирование хорошо согласуется с экспериментальной картиной. Но измерения показывают наличие громадного (до 20 тыс. км!) резервуара солнечной плазмы внутри верхней части щита. При этом механизм проникновения плазменных струй сквозь магнитный щит до сих пор не ясен. Считается, что *пересоединение* (аннигиляция) противоположных полей — это основной механизм проникновения плазмы сквозь щит, но, несмотря на косвенные подтверждения, микропроцессы, ответственные за аннигиляцию, пока неизвестны. Более того, именно для их выявления интенсивно обсуждаются проекты одновременной работы спутников, находящихся в нескольких километрах друг от друга. В нашей стране, в частности, разрабаты-

Магнитный щит со стороны Солнца 16 декабря 1998 (7 ч 01 мин 15 с по Гринвичу), результаты МГД-моделирования обтекания магнитосферы солнечным ветром (Н. Мэйнард, 2004). Величина магнитного поля (в гауссах) возрастает от зеленого к фиолетовому (шкала уловных цветов дана внизу). Блкие контуры — сечения щита плоскостями, перпендикулярными линии Солнце–Земля на расстоянии от 1 до 9 радиусов Земли.

ется проект **“РОЙ”** (Земля и Вселенная, 2001, № 4 задуманный еще в 1970-х одним из пионеров советских космических исследований профессором Ю.И. Гальпериным (1932–2001 гг., Земля и Вселенная, 2002, № 4). Надеемся, что **“РОЙ”** позволит, наконец, понять микрофизику плазменных брешей и помощью радиопросвечивания (томографии) между 4–5 спутниками постро-

ить объемную картину прорыва узких плазменных струй сквозь геомагнитный щит.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПЛАЗМЫ

Усилия, предпринятые, чтобы разгадать тайну, не напрасны. Образование турбулентности с элементами самоорганизации (квази-когерентные структуры — струи и электрические волновые пакеты) из ламинарного потока — это общезначимая проблема. Выявлены *“плазменные брешы”* — области очень малого магнитного поля на *“поверхности”* магнитного щита. Оказывается, *“брешь”* может возникнуть над полярными каспами и вблизи противоположно направленных магнитных полей. Это необходимое, но недостаточное условие для аннигиляции (физической, а не численной!) магнитных полей. Магнитный щит может регулярно продавливаться над полюсами, но не пропускать основную часть заторможенной солнечной плазмы. Как *“прорывается”* щит в условиях низкого магнитного поля? В турбулентной области при минимуме магнитного поля происходит пересоединение полей, что позволяет

плазме проникать внутрь щита (это один из способов *“прорыва”* щита). Нерезонансное просачивание плазмы сквозь структурированную границу также существенно для ее переноса, эффективность которого обратно пропорциональна квадрату величины магнитного поля. Характерно уменьшение поля в *“бреши”* на порядок, тогда диффузия возрастет на два порядка! Это и делает диффузию основным процессом, ответственным за частичную прозрачность магнитного щита. Таким образом, исследование роли и свойств турбулентности в *“брешах”* выявило ключевое значение микропроцессов во время взаимодействия потоков плазмы с магнитными препятствиями (поля Земли и планет, звезд, черных дыр или лабораторных ловушек) и показало реальные механизмы преобразования энергии в бесстолкновительной плазме. Не найдены катастрофические угрозы со стороны *“плазменных брешей”* в магнитном щите для атмосферы планеты, хотя исследования, проведенные в ИКИ, помогли приблизиться к ответу на вопрос, почему так происходит.

Обнаруженные *эффекты структуризации* плазменных потоков представляют интерес для космической физики, лабораторной и астрофизической плазмы. В изучении микропроцессов на границе магнитного щита достигнут несомненный прогресс. Это произошло во многом благодаря использованию глобального численного моделирования (как инструмента современных исследований). Научному сообществу теперь придется считаться с перспективой пересмотра ламинарного взаимодействия потока плазмы с гладким препятствием в пользу динамических процессов, происходящих с образованием неоднородных нестационарных плазменных струй как следствия структуризации течения над участками щита, прогнутаго в местах минимума его магнитного давления. Стала очевидной необходимость рассмотрения квантовых эффектов в поведении потоков плазмы: локализованные магнитозвуковые струи имеют свойства фононов, излучаемых системой поток — препятствие, когда энергия и импульс уменьшаются. Поэтому не исключено, что в обозримом будущем удастся разработать *“плазменные мазеры”*...

Граница гелиосферы

В. В. ИЗМОДЕНОВ,
кандидат физико-математических наук
Институт космических исследований РАН

Осенью 2003 г. в средствах массовой информации появилось множество сообщений о том, что американская АМС "Вояджер-1", запущенная в 1977 г., достигла окрестности Солнечной системы (Земля и Вселенная, 1978, № 2; 2004, № 3). Большой резонанс вызвали публикации разных точек зрения по поводу этого события. Например, специалисты под руководством С. Кримиджиса из Лаборатории прикладной физики при Университете Джона Хоп-



кинса (Балтимор, шт. Мэриленд) сообщили, что "Вояджер-1" пересек гелиосферную ударную волну в августе 2002 г. на расстоянии 85 а.е. группа под руководством Ф. МакДональда из Университета штата Мэриленд и Э. Стоуна из Калифорнийского технологического института высказала мнение, что зонд еще не достиг ударной волны, которую принято считать границей гелиосферы. Где же располагается граница гелиосферы?

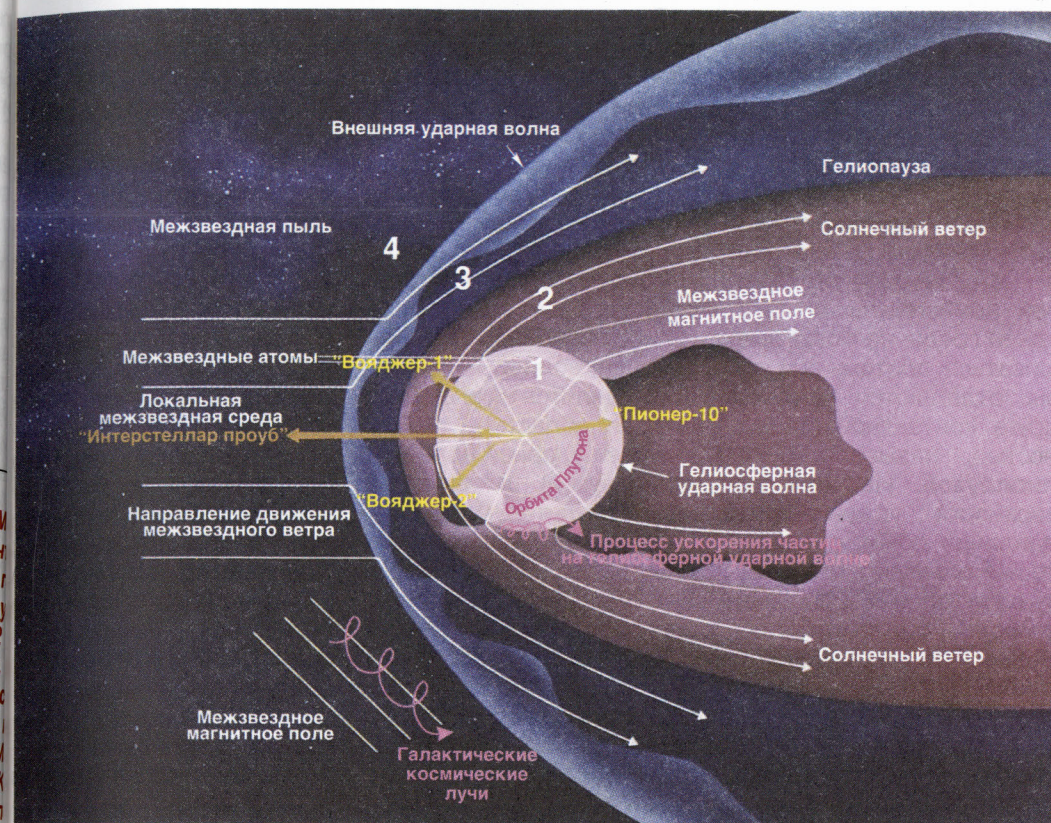
ВНЕШНЯЯ ГЕЛИОСФЕРА

Современная концепция гелиосферы формируется с 1960-х гг. благодаря пионерским работам Е. Паркера, В.Б. Баранова и др. Американский астроном Е. Паркер высказал предположение о существовании солнечного ветра за несколько лет до его открытия в 1959–1961 гг. с помощью советских АМС "Луна-2", "Луна-3" и "Венера-1". Солнечный ветер –

это результат теплового расширения солнечной короны. Он представляет собой высокоскоростной поток полностью ионизованной плазмы, заполняющей межпланетное пространство. Область космического пространства, занятую солнечным ветром, принято называть **гелиосферой** (Земля и Вселенная, 1968, № 6; 1980, № 1; 1983, № 2).

В настоящее время свойства солнечного вет-

ра хорошо изучены благодаря успешным космическим программам IMP-7 (другое название "Эксплорер-50", 1973–2000), "Улисс" (с 1990), "SOHO" (1995), "Интербол" (1998) и др. (Земля и Вселенная, 1990, № 5; 1996, № 3; 1997, № 1; 2003, № 1). Хотя параметры солнечного ветра меняются в зависимости от солнечной широты и периода солнечной активности, можно утверждать, что



Трехмерная картина гелиосферного интерфейса – области взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой, считающейся границей Солнечной системы. Гелиосферный интерфейс разделен на четыре области: 1 – до ударной волны со сверхзвуковым солнечным ветром; 2 и 3 – гелиошис, или ударный слой (внутренний и внешний); 4 – поток сверхзвуковой межзвездной плазмы. Рисунок NASA.

гидродинамическая теория Е. Паркера подтверждена экспериментально*. Согласно этой теории, изменение скорости солнеч-

ного ветра определяется действием гравитационного поля Солнца и градиентом его давления. На достаточно большом удалении от нашего светила (начиная с 1 а.е.) скорость солнечного ветра становится постоянной и уже не меняется с увеличением расстояния, на орбите Земли – около 400 км/с. По теории Е. Паркера, она должна оставаться такой вплоть до бесконечности, что, очевидно, противоречит свойствам окружающей Солнце межзвездной среды. Для того чтобы разрешить это противоре-

чие, Е. Паркеру пришлось разработать в 1961 г. несколько моделей взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой. В 1970 г. советскими учеными В.Б. Барановым, К.В. Краснобаевым и Г.А. Куликовским построена **гидродинамическая модель** сверхзвукового обтекания солнечного ветра межзвездной средой. Для обоснования гидродинамической модели сделано предположение, что межзвездный газ представляет собой полностью ионизованную водородную плазму. Предложенная в мо-

* В капсуле американского КА "Генезис" в сентябре 2004 г. на Землю впервые доставлены частицы солнечного ветра для исследований (Земля и Вселенная, 2002, № 1; 2005, № 2).

дели картина течения легла в основу современной концепции внешней гелиосферы.

Область взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой часто называют **гелиосферным интерфейсом**. Поток солнечного ветра и заряженной компоненты межзвездной среды не могут смешиваться, поэтому они как бы отделяются друг от друга контактной поверхностью, называемой **гелиопаузой**. На этой поверхности уравниваются давления обеих сред, которые обтекают гелиопаузу с внутренней и внешней сторон соответственно. Ионизованный газ не перетекает через контактную поверхность, поэтому для него она подобна твердой стенке. Известно, что затормозить сверхзвуковой поток газа до скоростей, меньших скорости звука, невозможно без образования в этом потоке ударной волны, то есть поверхности, на которой скорость потока резко падает, а температура резко возрастает. Так при обтекании контактной поверхности сверхзвуковым потоком солнечного ветра образуется ударная волна, называемая **гелиосферной**. В ней скорость солнечного ветра падает с 450 км/с примерно до 100 км/с, а температура поднимается до нескольких миллионов градусов Кельвина. Во внешней ударной волне поток межзвездной среды тормозится примерно с 25 км/с до 12–15 км/с, а его температура увеличивается до 1.5×10^4 К.

Гелиопауза, гелиосферная и внешняя ударные волны делают гелиосферный интерфейс на четыре области с существенно различными параметрами плазмы. Первая область (до гелиосферной ударной волны) заполнена сверхзвуковым солнечным ветром. Ударный слой между гелиосферной и внешней ударной волной — **гелиошис** — делится на внешнюю (вторая область — между внешней ударной волной и гелиопаузой) и внутреннюю (третья — между гелиопаузой и ударной волной) части пространства. В четвертой области межзвездная плазма течет со сверхзвуковой скоростью.

Под границей гелиосферы, строго говоря, нужно понимать **гелиопаузу**, которая отделяет солнечный ветер от заряженной компоненты межзвездной среды. Впрочем, границей гелиосферы часто называют **гелиосферную ударную волну**, где скорость солнечного ветра резко снижается менее чем до 100 км/с. Именно к гелиосферной ударной волне сейчас и приблизились АМС "Вояджер-1 и -2" (Земля и Вселенная, 2004, № 3), в то время как "Пионер-10" (Земля и Вселенная, 2003, № 3) летит в хвостовую область гелиосферного интерфейса и еще далек от нее. По современным оценкам, расстояние до гелиосферной ударной волны в направлении набегающего потока межзвездной среды составляет **90–100 а.е.**, до гелиопаузы — около **150 а.е.**, до внешней ударной волны — **250 а.е.** В хвостовой части гелиосферного

интерфейса расстояние до гелиосферной ударной волны существенно больше — **180–200 а.е.**

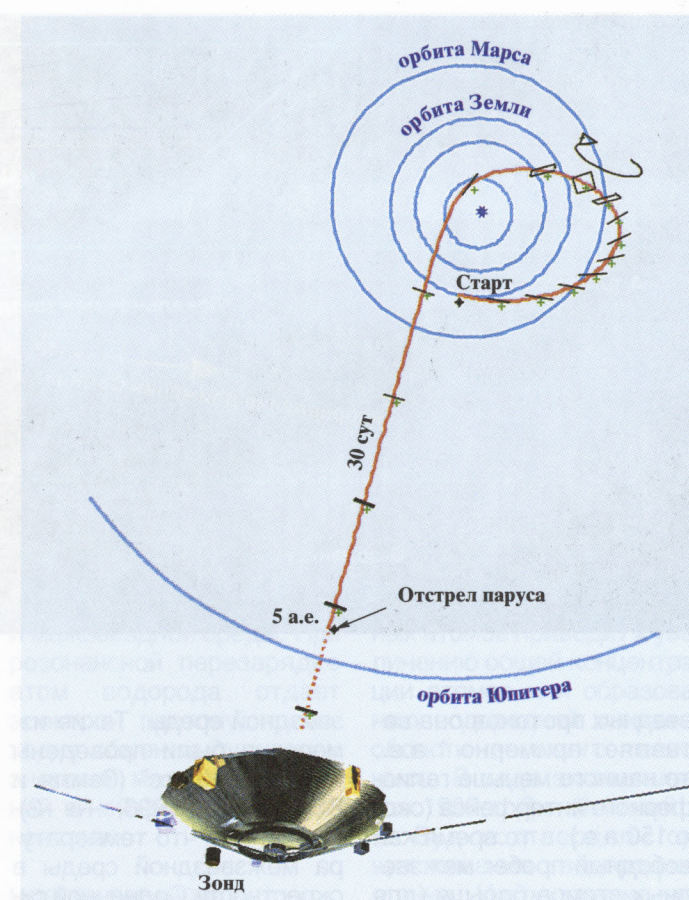
Влияние гелиосферы на межзвездную среду простирается и за внешнюю ударную волну. Бывший научный сотрудник ИКИ РАН в настоящее время профессор Университета Южной Калифорнии в Лос-Анжелесе М. Грунтман еще в середине 1980-х гг. выдвинул гипотезу о том, что рожденные в сверхзвуковом солнечном ветре энергичные атомы приводят к возмущению параметров межзвездной среды на расстоянии 300–400 а.е. Позднее эта гипотеза была подтверждена численными расчетами и сейчас иногда называется эффектом Грунтмана. Он учитывается при планировании перспективных космических проектов для изучения локального межзвездного пространства. Один из них — американский проект **"Интерстеллар проуб"** (Interstellar Probe — межзвездный зонд). Его основная цель — определение основных параметров различных компонент невозмущенной области влияния Солнца межзвездной среды — плазмы, атомов водорода, космической пыли, направления и напряженности межзвездного магнитного поля, а также спектра космических лучей. Для достижения этой цели планируется запустить космический аппарат массой 246 кг, удаляющийся от Солнца с большой скоростью. Расстояние 200–250 а.е. должно быть достигнуто за 15 лет.

Траектория движения межзвездного зонда по проекту "Интерстеллар проуб" со скоростью более 75 км/с, что соответствует 15 а.е. в год (для сравнения: скорость АМС "Вояджер" — 3–4 а.е. в год). NASA планирует запустить космический аппарат не ранее 2020 г. Рисунок NASA.

Во время полета предполагается использовать солнечный парус радиусом 200 м и плотностью (с учетом механизмов его крепления) 1 г/м^2 , тогда космический аппарат будет двигаться под действием давления солнечных фотонов. Он сначала приблизится к Солнцу на расстояние 0.25 а.е., а затем, развернув парус перпендикулярно потоку солнечного ветра, достигнет необходимых скоростей. На расстоянии 5 а.е., где давление солнечного света мало и ускорение отсутствует, намечен отстрел солнечного паруса и дальнейший полет КА без него. В настоящее время NASA только разрабатывает концепцию и научную программу "Интерстеллар проуб", а запуск КА будет произведен не ранее 2020 г. (<http://interstellar.jpl.nasa.gov/>).

МЕЖЗВЕЗДНЫЕ АТОМЫ

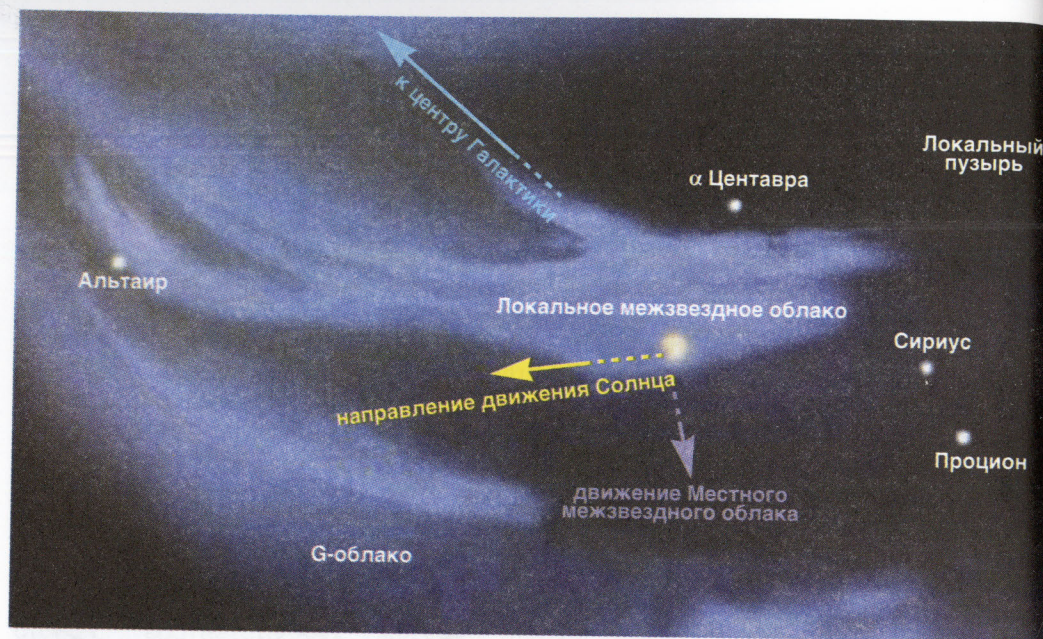
С 1971 г. ведутся измерения рассеянного солнечного излучения в линиях 12.16 нм (линия атомарного водорода Лайман-альфа) и 5.84 нм (линия атомарного гелия). Эксперименты на американской геофизической обсерватории "OGO-5" (запущена в 1968 г.) и советских на-



учных спутниках "Прогноз-5 и -6" (1976–1977 гг.) подтвердили гипотезу о движении межзвездной среды со сверхзвуковой скоростью относительно Солнца. Суть экспериментов по рассеянному солнечному излучению состоит в следующем. Межзвездные атомы (в основном водорода и гелия) приближаются к Солнцу на расстояние до 1 а.е. Солнечное излучение рассеивается благодаря этим атомам, а рассеянные фотоны регистрируются научными ИСЗ. По форме спектра и интенсивности рассеянного излучения определяют

параметры межзвездных атомов в окрестности Солнца. На космических аппаратах "Прогноз" и "SOHO" использовался специальный водородный фильтр для наиболее точного определения температуры и скорости атомов.

В отличие от заряженной компоненты межзвездные атомы проникают сквозь гелиопаузу внутрь гелиосферы. Разница между нейтральной компонентой межзвездной среды и заряженной состоит в том, что длина свободного пробега межзвездных атомов намного больше, чем заряженных частиц. Для меж-



звездных протонов она составляет примерно 1 а.е., что намного меньше гелиосферного интерфейса (около 150 а.е.), в то время как свободный пробег межзвездных атомов больше (для гелия) или сравним (для водорода) с размером гелиосферы. Поэтому атомы свободно проникают через гелиопаузу. Приближаясь к Солнцу на расстояние меньше 5 а.е., атомы испытывают воздействие сил солнечной гравитации и фотоионизации. Так как для атомов межзвездного гелия длина свободного пробега больше размера гелиосферы, их параметры не изменяются при прохождении гелиосферного интерфейса. Следовательно, измеряя движение атомов межзвездного гелия внутри гелиосферы, можно точно определить температуру и относительную скорость локальной меж-

звездной среды. Такие измерения были проведены на АМС "Улисс" (Земля и Вселенная, 1996, № 3). Оказалось, что температура межзвездной среды в окрестности Солнечной системы составляет 6700 К, а скорость ее относительно движения – 26.4 км/с. Эти значения практически совпали с величинами, определенными из спектроскопических наблюдений линий поглощения межзвездной среды.

Спектроскопические исследования, проведенные, в частности, Р. Лалльман (Франция), Дж. Линским и Б. Вудом (США), позволили определить картину локальной межзвездной среды в окрестности Солнечной системы. В настоящее время наша звезда находится на границе небольшого межзвездного облака (**Локальное межзвездное облако**, ЛМО) диаме-

Структура межзвездной среды окрестности Солнца. Локальное межзвездное облако и G-облако находятся в Локальном пузыре – результате взрыва сверхновой (или нескольких сверхновых). Солнце движется из ЛМО и может оказаться в соседнем G-облаке либо в горячей плазме Локального пузыря. Рисунок NASA.

тром несколько парсеков (сотни а.е.). ЛМО принадлежит небольшой группе близких к нам облаков с температурой $5-10 \times 10^3$ К и концентрацией частиц в них порядка 0.1 см^{-3} . Считается также, что вся эта группа облаков находится внутри гипотетического горячего **Локального пузыря** – области межзвездного пространства (характерный размер порядка 100 пс), заполненной ионизованной плазмой (температура – 10^6 К, концент-

рация частиц – около 0.002 см^{-3}). Природа Локального пузыря – тема многочисленных научных дискуссий. Согласно одной из гипотез, Локальный пузырь появился в результате взрыва сверхновой (или нескольких сверхновых) примерно миллиард лет тому назад.

Солнце находится почти на границе ЛМО. Ближайшим к нему является G-облако. Параметры газа в G-облаке близки к параметрам ЛМО. Температура G-облака – 5400 К, а его скорость относительно Солнца – около 30 км/с. В настоящее время неизвестно, примыкают ЛМО и G-облако друг к другу или разделены участком горячей плазмы Локального пузыря, в котором оба находятся. Примерно через 3×10^3 лет Солнце выйдет из ЛМО и окажется либо в соседнем G-облаке, либо в горячей плазме Локального пузыря.

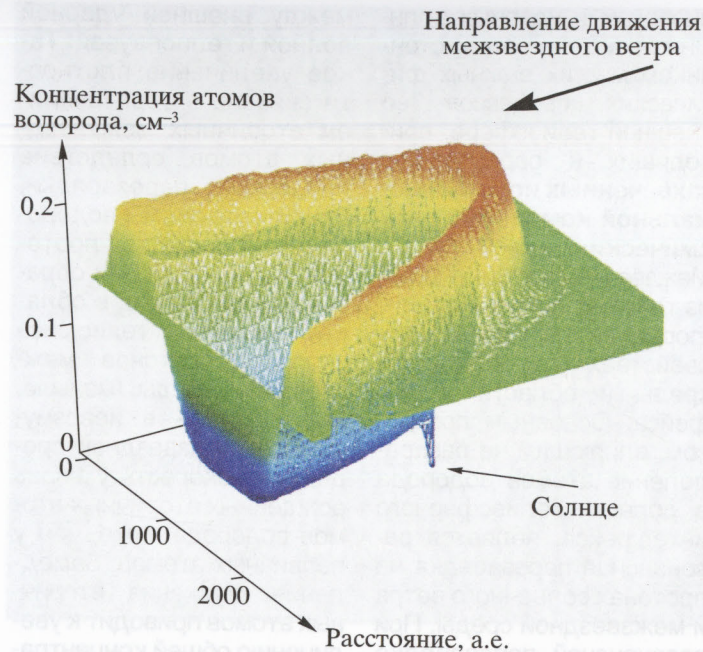
В отличие от атомов гелия длина свободного пробега межзвездных атомов водорода сравнима с размером гелиосферы. Роль межзвездных атомов водорода как основной компоненты в гелиосфере невозможно переоценить. ЛМО состоит из водорода (90%), гелия (9.9%), кислорода, азота и других элементов. Степень ионизации водорода в ЛМО – 15–20%. По различным оценкам, концентрация атомов водорода в облаке в окрестности Солнца – около 0.2 см^{-3} . Атомы водорода существенно влияют на структуру гелиосферного интерфейса, положение ге-

лиопаузы и ударных волн. Они также являются источником многих важных физических процессов во внешней гелиосфере, приводящих к образованию **захваченных ионов и аномальной компоненты космических лучей (АКЛ)**. Межзвездные атомы – один из главных источников информации о локальных свойствах межзвездной среды и области интерфейса. Основным процессом, влияющим на распределение атомов водорода в области гелиосферного интерфейса, является резонансная перезарядка на протонах солнечного ветра и межзвездной среды. При резонансной перезарядке атом водорода отдает электрон протону, происходит обмен импульсом и энергией между заряженной и нейтральной компонентами.

МОДЕЛЬ БАРАНОВА – МАЛАМЫ

Модель взаимодействия двухкомпонентной межзвездной среды, содержащей нейтральные атомы и заряженные частицы, с солнечным ветром была создана в 1993 г. российскими учеными В.Б. Барановым и Ю.Г. Маламой. В рамках этой модели удалось сделать несколько предсказаний, подтвержденных экспериментально. Одно из них – **водородная стенка** в области внешнего гелиошиса. Под водородной стенкой понимается увеличенная по сравнению с межзвездной средой плотность атомов водорода в области

между внешней ударной волной и гелиопаузой. Такое увеличение плотности связано с образованием вторичных межзвездных атомов вследствие процесса перезарядки. Вторичные атомы водорода имеют свойства протонов, из которых они образовались. Так как в области внешнего гелиошиса скорость протонов межзвездной среды меньше, чем скорость в невозмущенной межзвездной среде, то и скорость у вновь рожденных вторичных атомов водорода ниже, чем у первичных атомов. Замедление движения вторичных атомов приводит к увеличению общей концентрации атомов или образованию водородной стенки в области внешнего гелиошиса. В ходе экспериментов 1996 г. Дж. Линский и Б. Вуд подтвердили существование водородной стенки. Исследования нескольких спектров ближних звезд, полученных с высоким разрешением на Космическом телескопе им. Хаббла (КТХ), показали, что спектры поглощения невозможно объяснить без введения дополнительной поглощающей среды. Неожиданно выяснилось, что ее параметры соответствуют параметрам вторичной компоненты межзвездных атомов водорода. Открытие гелиосферной водородной стенки дало новый импульс к лучшему пониманию наблюдаемых спектров поглощения. В частности, Дж. Линский и Б. Вуд, а также автор статьи с коллегами для объяснения измеряемых спект-



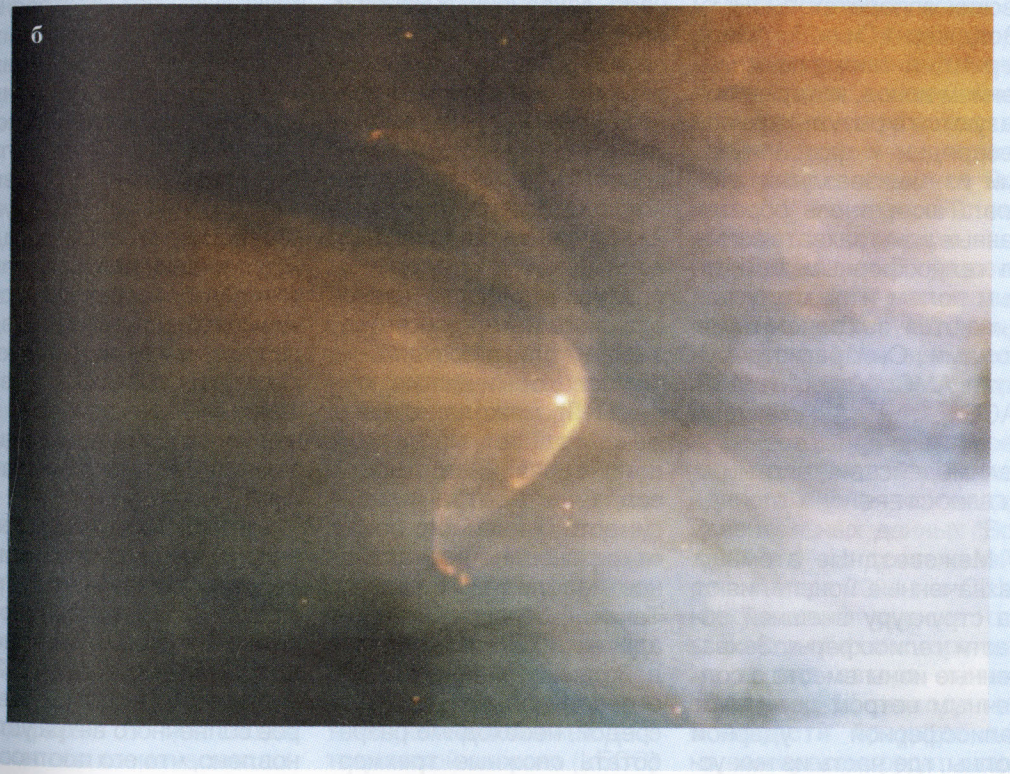
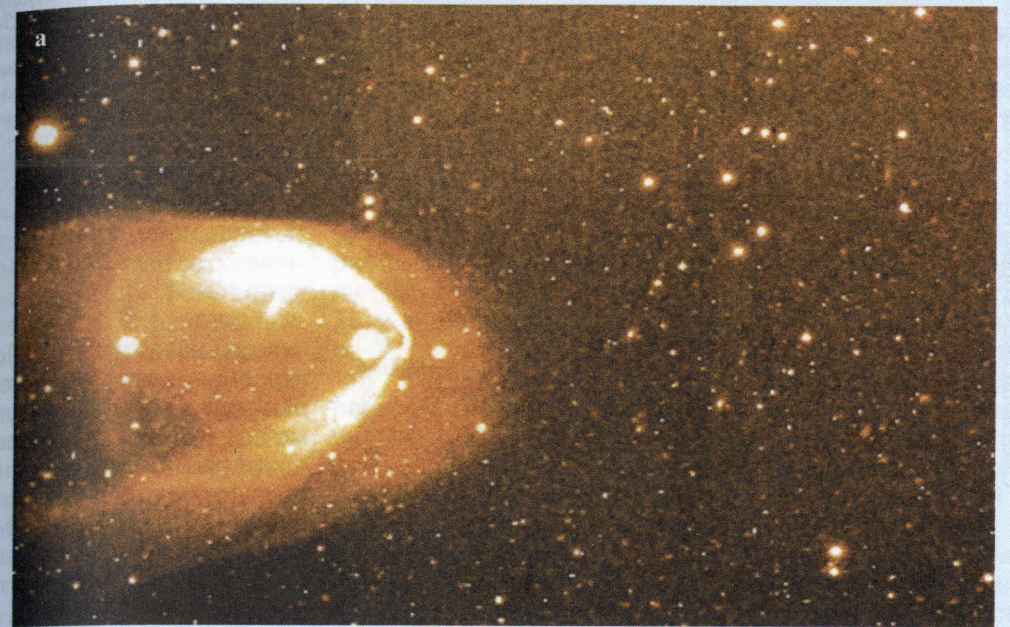
Водородная стенка (в условных цветах) — по сравнению с межзвездной средой увеличена концентрация атомов водорода области между внешней ударной волной и гелиопаузой. Уменьшение содержания межзвездных атомов соответствует области сильной ионизации в окрестности Солнца. Зеленым цветом обозначена концентрация атомов Локального межзвездного облака, красным — в водородной стенке. Рисунок сделан М. Грунтманом на основе расчетов автора.

ров поглощения предположили, что около звезды должна существовать водородная стенка. Оказалось, что по наблюдаемому спектру поглощения можно оценить параметры водородной стенки около звезды, а затем и характеристики звездного ветра. Так был открыт новый способ диагностики потоков звездного ветра. Для некоторых типов звезд этот способ — единственный. Несколько исследовательских проектов NASA (в рамках бюджета агентства по проектам в области астрофизики) под руководством Дж. Линского и Б. Вуда посвящены наблюдению (с помощью KTX) и интерпретации измерений спектров поглощения и определению параметров звездных ветров. Недавно с помощью KTX и наземного телескопа WIYN (Китт

Пик, шт. Аризона) получены уникальные изображения астросфер (подобие гелиосферного интерфейса) от молодой звезды LL в созвездии Ориона и двойной звезды BZ в созвездии Жирафа. Обе эти звезды обладают огромными астросферами, во много раз превышающими гелиосферу. На оригинальных снимках хорошо видны структуры с ударными волнами, аналогичные структуре гелиосферного интерфейса. Поэтому они выглядят так, будто мы смотрим на гелиосферу со стороны.

Другим существенным достоинством модели Баранова-Маламы стало предсказание торможения солнечного ветра на больших гелиоцентрических расстояниях вследствие процесса перезарядки. Перезарядка приводит к потере протонов сверхзвуко-

вого солнечного ветра имеющих скорость около 400 км/с, и приобретении солнечным ветром протонов межзвездных атомов со скоростью 20–25 км/с. В результате происходит медленное торможение солнечного ветра, что и зафиксировали приборы "Вояджера-1". По торможению солнечного ветра можно оценить концентрацию атомов водорода во внешней гелиосфере, в окрестности ударной волны она составляет 0.09–0.1 см⁻³. В области гелиосферного интерфейса происходит фильтрация межзвездных атомов водорода, то есть уменьшение их плотности по сравнению с межзвездной средой. Согласно модели Баранова — Маламы, такая фильтрация составляет примерно 50%. Следовательно, концентрация атомов в локальной межзвездной среде — 0.18–0.2 см⁻³. Другие способы определения концентрации атомов связаны с косвенными измерениями параметров межзвездных атомов по рассеянному солнечному Лайман-альфа излучению на косми-



Астросферы вокруг других звезд (подобие гелиосферного интерфейса): а) двойная звезда BZ в созвездии Жирафа, б) молодая звезда LL в созвездии Ориона. Фото NASA.

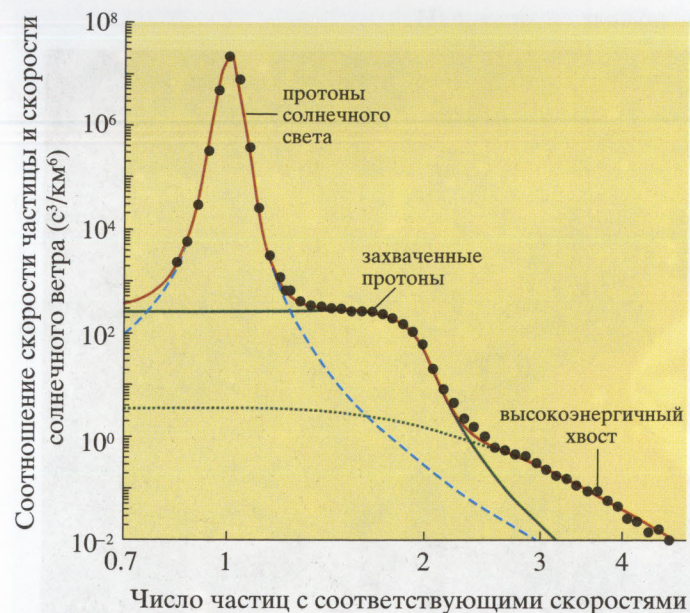


График типичного спектра протонов, измеренного прибором AMC "Улисс" (ESA – NASA). Захваченные протоны создают плато "ступеньку", виден также "хвост", образующийся вследствие стохастического ускорения захваченных ионов. Рисунок предоставлен автору Д. Глеклером.

ческих аппаратах "SOHO", "Вояджер-1 и -2", "Пионер-10", а также по измерениям ионов, которые образуются в результате перезарядки и фотоионизации из межзвездных атомов. Такие вновь образованные ионы захватываются гелиосферным магнитным полем и поэтому называются **захваченными ионами**. Они регистрируются AMC "Улисс" и ИСЗ "ACE".

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЧАСТИЦ В ГЕЛИОСФЕРЕ

Межзвездные атомы и захваченные ионы влияют на структуру внешней области гелиосферы. Захваченные ионы вместе с солнечным ветром достигают гелиосферной ударной волны, где часть из них ускоряется до высоких энергий порядка нескольких десятков МэВ. Ускоренная

часть захваченных ионов и АКЛ влияют на структуру гелиосферной ударной волны, образуя область плавного замедления потока солнечного ветра непосредственно перед скачком плотности. Кроме них на возникновение ударных волн и распределение плазмы в области гелиосферного интерфейса оказывают влияние **галактические космические лучи** (ГКЛ), межпланетное и межзвездное магнитное поле, вариации плотности солнечного ветра и зависимость солнечного ветра от фазы солнечной активности (солнечного цикла). Таким образом, чтобы адекватно описать взаимодействие солнечного ветра с локальной межзвездной средой, необходимо разрабатывать сложные трехмерные нестационарные многокомпонентные модели, имеющие точное описание

каждой из компонент. Построение таких моделей ведется в настоящее время под руководством профессора В.Б. Баранова на механико-математическом факультете МГУ и в лаборатории физической газовой динамики Института проблем механики РАН. В частности, за последние несколько лет построены модели гелиосферного интерфейса с учетом влияния АКЛ, ГКЛ, межзвездного магнитного поля, ионов межзвездного гелия и альфа-частиц в солнечном ветре. Другие научные группы придерживаются гидродинамической модели, которая не отражает точное содержание атомов водорода в гелиосферном интерфейсе, а ее использование может привести к неверной интерпретации экспериментальных данных.

Недавно нам удалось решить задачу о взаимодействии солнечного ветра в разных фазах солнечного цикла с двухкомпонентной межзвездной средой. За 30 лет измерений параметров солнечного ветра установлено, что его плотность и скорость испытывают 11-летние колебания в соответствии с циклами сол-

нечной активности. При описании структуры внешней гелиосферы особенно важен тот факт, что кинетическая энергия солнечного ветра (его плотность, умноженная на квадрат скорости) на орбите Земли сначала увеличивается, а потом уменьшается почти в два раза за солнечный цикл. В результате возникают существенные колебания (10%) положения гелиосферной ударной волны. Это необходимо учитывать для правильного предсказания времени пересечения гелиосферной ударной волны AMC "Вояджер-1". Отметим, что в течение 11-летнего цикла солнечной активности происходят незначительные колебания гелиопаузы (увеличение или уменьшение на 4 а.е.), а внешняя ударная волна практически их не испытывает. Одно из проявлений солнечной активности – образование **дополнительных ударных волн и волн разрежения** в области между гелиопаузой и внешней ударной волной. Они возникают вследствие колебаний гелиопаузы, которая для потока межзвездной плазмы играет роль препятствия.

ЧТО ЖЕ ПЕРЕСЕК "ВОЯДЖЕР"?

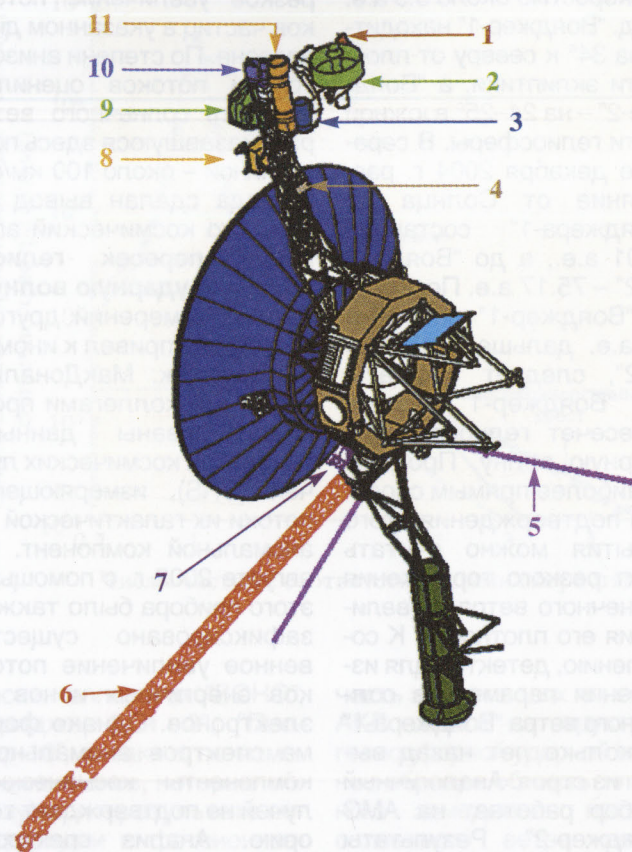
AMC "Вояджер-1 и -2" после завершения своей основной миссии приступили к изучению внешней гелиосферы. В настоящее время оба космических аппарата движутся по направлению к набегающему потоку межзвездной среды

со скоростью около 3.5 а.е. в год. "Вояджер-1" находится на 34° к северу от плоскости эклиптики, а "Вояджер-2" – на $24-25^\circ$ в южной части гелиосферы. В середине декабря 2004 г. расстояние от Солнца до "Вояджера-1" составило 94.01 а.е., а до "Вояджера-2" – 75.17 а.е. Поскольку "Вояджер-1" почти на 20 а.е. дальше "Вояджера-2", следует ожидать, что "Вояджер-1" первым пересечет гелиосферную ударную волну. Простым и наиболее прямым способом подтверждения этого события можно считать факт резкого торможения солнечного ветра и увеличения его плотности. К сожалению, детектор для измерения параметров солнечного ветра "Вояджера-1" несколько лет назад вышел из строя. Аналогичный прибор работает на AMC "Вояджер-2". Результаты измерений можно найти в Интернете по адресу: <http://web.mit.edu/afs/athena/org/s/space/www/voyager/voyager.html>

Не имея возможности регистрировать солнечный ветер, специалисты вынуждены использовать данные других приборов "Вояджера-1". Так, группа ученых из Лаборатории прикладной физики под руководством Т. Кримиджиса проанализировала величину и анизотропию потоков энергичных заряженных частиц с энергиями 0.57–1.78 МэВ, измеренные детектором заряженных частиц низкой энергии (LECP) AMC "Вояджер-1". В течение примерно 200 сут, с августа 2002 г., замечено

резкое увеличение потоков частиц в указанном диапазоне. По степени анизотропии потоков оценили скорость солнечного ветра, оказавшуюся здесь постоянной – около 100 км/с. Отсюда сделан вывод о том, что космический аппарат **пересек гелиосферную ударную волну**. Анализ измерений другого прибора привел к иному выводу. Дж. МакДональд и его коллегами проанализированы данные детектора космических лучей (CRS), измеряющего потоки их галактической и аномальной компонент. В августе 2002 г. с помощью этого прибора было также зафиксировано существенное увеличение потоков энергичных ионов и электронов. Однако форма спектров аномальной компоненты космических лучей не подтверждает теорию. Анализ спектров АКЛ говорит о том, что "Вояджер-1" не пересек гелиосферную ударную волну. Повышенный уровень потоков энергичных частиц подтверждает, что зонд находится пока еще в области предфронта, формируемого АКЛ.

В настоящее время среди исследователей нет единого мнения по поводу удивительных данных "Вояджера-1". На состоявшейся в январе 2004 г. в США конференции ученые отстаивали обе точки зрения. На взгляд автора статьи, **"Вояджер-1" находился в области предфронта**, но не пересек фронт ударной волны. Можно лишь утверждать, что во второй половине 2002 г. "Вояджер-1"



Размещение научных приборов на АМС "Вояджер-1": 1 — ультрафиолетовый спектрометр, 2 — интерференционный ИК-спектрометр, 3 — фотополариметр, 4 — детектор заряженных частиц низкой энергии, 5 — антенна для регистрации радиоизлучения планет и волн в плазме, 6 — магнитометр для измерения слабых магнитных полей, 7 — магнитометр для измерения сильных магнитных полей, 8 — детектор космических лучей, 9 — детектор плазмы, 10 — телекамера с широкоугольным объективом, 11 — камера с телеобъективом. Рисунок NASA.

находился в непосредственной близости от гелиосферной ударной волны, но делать окончательный вывод еще рано.

Положение ударной волны в пространстве изменяется в зависимости от фазы солнечного цикла. По нашим расчетам, в 2002 г. ударная волна была на минимальном расстоянии от Солнца, а затем начала удаляться от него на 3–4 а.е. в год. Как это ни парадоксально, но примерно с такой же скоростью движется от Солнца "Вояджер-1". В течение 3–4 лет гелиосферная ударная волна продолжит удалять-

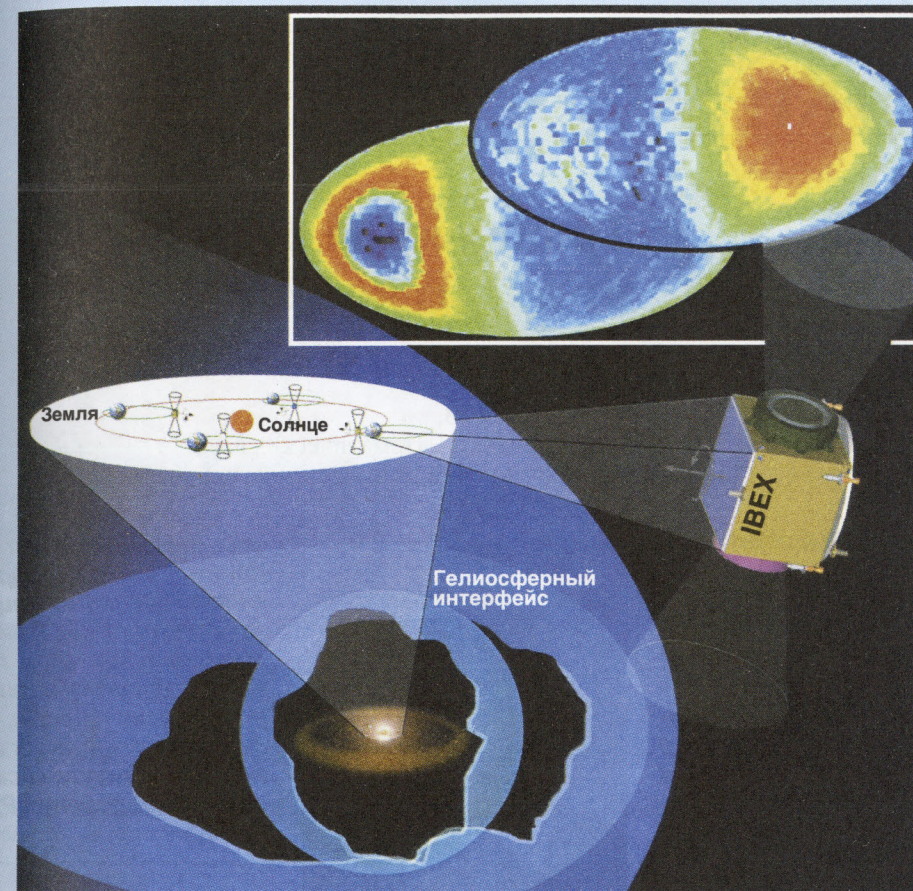
ся от Солнца, а затем снова начнет приближаться к светилу. Заметим, что при движении ударной волны возможны мелкомасштабные колебания ее фронта вследствие флуктуаций среды. Поэтому уже в ближайшее время АМС "Вояджер-1" может несколько раз пересечь гелиосферную ударную волну.

НОВЫЕ ПРОЕКТЫ

"Вояджер-1 и -2" сейчас открывают новую страницу в освоении космического пространства. Впервые они долетают до гелиосферной ударной волны — предвест-

ницы границы гелиосферы. Несомненно, что измерения, проведенные в области за ударной волной, существенно изменят представления о природе среды на границе Солнечной системы. Исследование гелиосферного интерфейса — сравнительно молодая бурно развивающаяся область науки.

В настоящее время NASA разрабатывает амбициозную программу изучения области взаимодействия солнечного ветра межзвездной средой и измерения параметров возмущенной межзвездной среды. Планируется через 10–15 лет достичь локальной межзвездной среды. Следует заметить, что проект "Интерстеллар проуб" рассматривается NASA как пробный перелет первого межзвездного КА к ближайшей звезде — α Центавра. Для этого требуется разработать новый тип космического аппарата и научные приборы.



Американский проект IBEX (исследователь межзвездной границы). На врезке вверху — предполагаемые результаты наблюдений для двух возможных моделей гелиосферного интерфейса. Рисунок предоставлен автору руководителем проекта IBEX Д. МакКомасом.

По мнению автора статьи, отечественный космический проект межзвездного полета мог бы стать одним из глобальных проектов России, стимулирующих развитие технологий

и, следовательно, способствующих экономическому развитию страны.

Наряду с проектом "Интерстеллар проуб" NASA обсуждает план изучения гелиосферного интерфейса с орбиты Земли. В частности, группой ученых под руководством Д. МакКомаса из Юго-Западного исследовательского института (шт. Техас) представлен в NASA проект IBEX (Interstellar Boundary Explorer — исследователь межзвездной границы). Автор настоящей статьи является участником этого проекта, в

рамках которого предполагается измерять с орбиты Земли потоки энергичных нейтральных атомов в диапазоне энергий 0.01–10 кэВ. Такие атомы рождаются в области между гелиосферной ударной волной и гелиопаузой и несут информацию о свойствах ее плазмы. Исследования позволят составить глобальную трехмерную картину гелиосферного интерфейса. Грядущее пересечение АМС "Вояджер-1" гелиосферной ударной волны могут привести к новым важным открытиям.

Тропические циклоны: взгляд из космоса

Е. А. ШАРКОВ,
 доктор физико-математических наук
 Институт космических исследований РАН

Генерация и эволюция тропических циклонов представляют для человечества серьезную и пока неразрешенную проблему. Автор, занимающийся физикой атмосферных катастроф, рассказывает о наиболее значительных этапах развития науч-



ных взглядов на это явление, полного драматизма, трансформаций заблуждений. Принципиальный вклад в понимание проблемы внесли российские ученые, и первую очередь специалисты Института космических исследований РАН.

ЭВОЛЮЦИЯ ЗНАНИЙ ОБ
 АТМОСФЕРНЫХ ВИХРЯХ

Тропическая зона глобальной системы океан-атмосфера играет ключевую роль в динамике и эволюции синоптических и климатических процессов на Земле. Она обладает уникальным свойством генерировать устойчивые мезомасштабные вихревые структуры. **Тропические циклоны (ТЦ)** рождаются из атмосферного турбулентного хаоса в **системе глобальной циркуляции**. Эти атмосферные вихри несут с собой

непосредственную опасность для жизни людей. Люди всегда рассматривали тропические циклоны (тайфуны) как наиболее деструктивные элементы взаимодействия океана и атмосферы, вызывающие значительные материальные потери и человеческие жертвы. Безрезультатны были все усилия подавить их какими-либо техническими средствами.

История развития и эволюции человеческих знаний и воззрений об атмосферных катастрофах весьма драматична. **Тропи-**

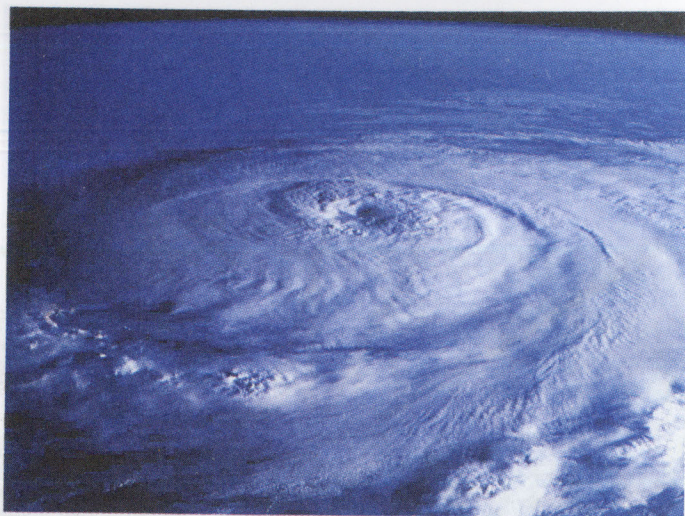
ческий циклогенез стабильно функционировал в акватории Мирового океана в течение очень длительного времени (по крайней мере, с последнего ледникового периода, завершившегося 10–12 тыс. лет назад). Однако европейцы узнали о существовании тайфунов лишь после второй экспедиции Колумба в 1494 г. Долгое время считалось, что это явление — обычный шторм, только очень большой силой ветра. Потом обратили внимание на своеобразии именно тропических вих-



Так выглядела после урагана "Жанна" система электросетей юго-восточной части штата Флорида. Сентябрь 2004 г. Фото NASA.



Последствия урагана "Иван" в штате Флорида. Мост, соединяющий два берега Эскамбийского залива, распался на отдельные секции. Повреждены и смыты прибрежные постройки. Сентябрь 2004 г. Фото NASA.



рей, их ежегодную повторяемость. На пути великих мореплавателей **Ф. Магеллана** и **Дж. Кука** непосредственно не «встретились» тропические циклоны, хотя известно, что корсары страдали от тайфунов неоднократно. До начала XIX в. наблюдения тропических циклонов были в общем-то эпизодическими.

Только в период освоения американского континента, в XVI–XVII вв., когда плавание через океан стали обычным делом, началось достаточно целенаправленное изучение циклогенеза над Атлантическим океаном. В 1802 г. адмирал **Френсис Бофорт** определил тропический циклон (ураган) как особое метеорологическое явление, отличающееся по силе ветра и состоянию поверхности моря. Введенная в 1806 г. **Ф. Бофортом** из чисто утилитарных соображений (для определения момента, когда порывы ветра разрывают паруса) количественная классификация, связавшая скорость

ветра с волнением моря, — *шкала Бофорта* — оказалась абсолютно правильной. Именно при достижении скорости ветра (33 м/с), когда рвутся паруса, формируется зрелая форма циклона и происходит перестройка его динамической структуры. Через четверть века американский инженер **У. Редфилд** впервые собрал сведения о тайфунах Атлантики (на современном языке — создал *базу данных*). И сделано это было настолько квалифицированно, что даже современные исследователи пользуются ею. **У. Редфилд** первым понял, что тропический ураган — это единая спиралевидная структура.

Результаты **дистанционного зондирования** из космоса и последних достижений теории сложных систем позволяют приблизиться к пониманию тропического циклогенеза. Теперь можно с большой долей вероятности говорить об определяющей роли тропических циклонов в формировании глобально-

Ураган «Эмили», за развитием которого наблюдали астронавты на «Френсис», полученное американским научно-орбитальным ИСЗ серии «DMSP». Август 2004 г.

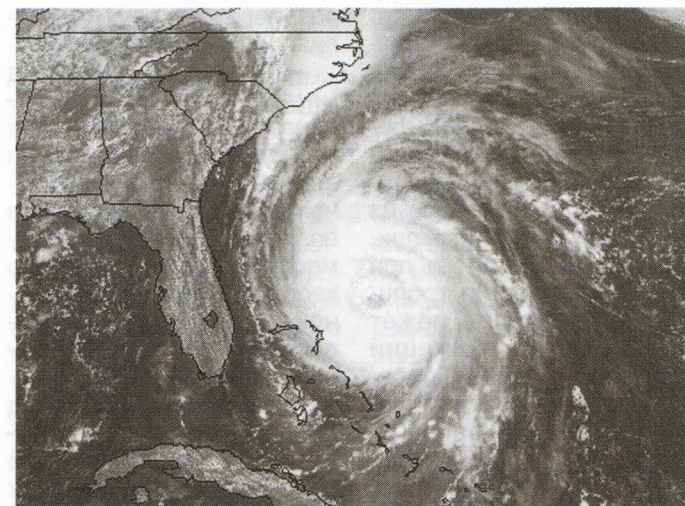
го массо- и энерго-обмена в глобальной системе океан-атмосфера и установлении климата, благоприятного для жизни. Глобальный тропический циклогенез — скорее всего, не обходимый и, возможно, определяющий фактор экологического равновесия геофизической системы океан-атмосфера и в экосистемах Земли. Катастрофические атмосферные вихри представляют своеобразный механизм эффективного сброса избыточного тепла в атмосферу в условиях, когда действие обычных основных механизмов (турбулентная конвекция и глобальная циркуляция) становится явно недостаточным. Можно сказать, что подобные катастрофические явления играют полезную для человечества роль. Такое казалось бы, парадокс. Действительно, отводя излишнее тепло, циклон способствует предотвращению чрезмерного перегрева планеты в тропической зоне.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДХОД

В 20–30-х гг. XIX в. был совершен принципиальный прорыв в понимании физической природы тропического циклона: предложены две гипотезы образования циклона — **термическая** и **динамическая**. Первая из них базируется на, казалось бы, ясном предположении: испаряясь с поверхности океана, водяной пар переходит

в облачные системы с выделением огромного количества тепла. Под воздействием силы Кориолиса, отклоняющей в результате вращения Земли любое прямолинейное движение, формируется внутри облачной массы крупномасштабный вихрь. Гипотеза оказалась настолько привлекательной и, казалось бы, соответствовала натурным наблюдениям, что и спустя 170 лет она в различных модифицированных формах имеет приверженцев. Но математическое моделирование и лабораторные эксперименты, выполненные значительно позднее — в 60-е гг. XX в., показали полную несостоятельность таких представлений. В этом механизме отсутствовало главное — **крупномасштабная термогидродинамическая неустойчивость**, то есть тот элемент, который связывает мелкомасштабные воздушные течения в единый спиральный вихрь, за которым следует цепочка ему подобных.

После Второй мировой войны, в 1947 г., в Германии попытались построить модель циклона на базе **термодинамического цикла Карно**. Внешняя работа над определенным объемом газа при его расширении и сжатии с изменением температуры обуславливает положительный КПД для устройств (или процессов), построенных на



этом принципе. Модель весьма привлекательна: в ней присутствует и тепловой источник энергии — океан, и «холодильник» — верхние слои атмосферы. Очень похоже на «тепловую машину» Карно. Однако тропический циклон никакого отношения к замкнутым тепловым машинам не имеет — это открытая система, работающая за счет непрерывного обмена с окружающей средой различными видами энергии. И как только обмен нарушается, циклон «заполняется» и преобразуется в различного вида посттайфуновые формы.

Человек пытался активно бороться с этим грозным явлением природы. На протяжении 20 лет (1963–1983 гг.) проводилась дорогостоящая американская программа «*Storm-fury*» (Ярость бури), в которой принимала участие значительная часть военно-воздушных сил США, базирующихся в Атлантике и Тихом океане. Несмотря на полученный огромный экспериментальный материал,

основные цели и задачи программы (подавление активности циклогенеза) не были выполнены. И произошла резкая смена направленности исследовательских работ в США в этой области. Убедившись в бесплодности активных воздействий на тайфуны, стали искать возможности прогнозировать эти явления. Помогли наблюдения Земли из космоса.

К середине 1960-х гг. относятся первые оптические и инфракрасные (ИК) изображения тропических циклонов, полученные с низкоорбитальных КА и полярных ИСЗ, а в середине 70-х гг. — с геостационарных метеоспутников.

В облачных формах, регистрируемых на спутниковых изображениях, можно обнаружить признаки дальнейшего усиления или ослабления шторма. На их основе вырабатывались некоторые правила, позволяющие составить прогноз эволюции развивающегося шторма. Далее информация стандартизируется для получения оп-

ределенного кода интенсивности, который используют в прогностических целях. Однако в значительной мере все это лишь феноменологические признаки, по сути угаданные, хотя и исходят зачастую из физических предположений. Существенную помощь при анализе движения тропических штормов может оказать **метод анимации** (мультипликация). Последовательные спутниковые изображения проецируются на экран, они доступны для анализа в режиме реального времени и экстраполяции движения тропического шторма в будущее (разумеется, с не очень большой заблаговременностью). Демонстрация по телевидению и в Интернете, а в последнее время и по мобильной связи таких анимационных последовательностей придает убедительность прогнозу. Например, можно предвидеть место выхода шторма на сушу.

Но все же схемы и модели, основанные главным образом на статистических данных, содержат грубые погрешности в прогнозировании, и становилось ясно, что даже при наличии космической информации, важную роль должны играть именно **физические модели генезиса** начальных форм циклона и эволюции зрелых форм.

ЭФФЕКТ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ

В настоящее время исследование генезиса и эволюции вихревых систем на фоне глобальной циркуляции и турбулентного хаоса тропической атмосферы

развивается в двух принципиальных направлениях:

– “**локальный**” подход (**индивидуальный циклогенез**), используемый при исследовании образования единичной (индивидуальной) вихревой структуры из волновых движений в атмосфере и турбулентного хаоса в условиях локальной и сильной неравномерности системы океан-атмосфера;

– “**глобальный**” подход (**множественный циклогенез**), рассматривающий образование тропических циклонов в акватории Мирового океана как совокупности центров генерации вихревых систем.

Локальный тропический циклон – явление природы крупного масштаба. Естественно считать, что его генезис обусловлен **гидродинамической неустойчивостью**, то есть состоянием системы, при котором ее физические параметры подвержены внезапному резкому изменению, когда появляются внутренние источники энергии.

Одной из попыток обнаружения такого рода неустойчивости в гидродинамике атмосферы была американская модель *CISK* (*Conditional Instability Second Kind* – условная неустойчивость второго рода). Эта, в значительной мере феноменологическая, модель считалась наиболее основательной в последние четыре десятилетия и обусловила появление целой плеяды “дочерних” моделей. Она была построена на основе **уравнений несжимаемой жидкости**, и суть ее в том, что возмущения во всей тропической зоне и в масштабах от-

дельного кучевого облака взаимодействуют посредством трения о морскую поверхность, факт существования которого экспериментально не доказан. Важнейший элемент в модели – вычисление параметров мелкомасштабной конвекции. Обратная связь крупномасштабной неустойчивости обеспечивается за счет усиления геострофического (отклоняемого силой вращения Земли) течения воздуха при увеличении давления в тропической депрессии. Модель *CISK* неплохо описывает крупномасштабную неустойчивость, но при выходе за пределы приближения о несжимаемой атмосфере она теряет все свое достоинство.

К началу 80-х гг. прошлого века выяснилось, что в решении этой сложнейшей задачи надо исходить из основных физических законов тропической атмосферы. Преимущество такого подхода (очень сложного в реализации, очевидно, поскольку он позволяет оправдать уже существующие эмпирические приемы обработки спутниковых данных) сформулировать новые недостающие правила, исходя из физических принципов. Необходимость такого концептуального перехода впервые была реализована физиками ИКИ РАН.

Под руководством академика **Р.З. Сагдеева** профессора **С.С. Моисеева** в 1983 г. в Институте разработана **теория генерации крупномасштабных вихрей** типа тропического циклона на основе мелкомасштабной **спиральной турбулентности** (винтообразных потоков). Это стало началом исследования возникновения и развития атмосферных вихрей – тропических циклонов.

Концепция спиральности параметризует (то есть приводит к удобному для исследования виду) три фактора – нелинейность, силу Кориолиса и энергетику системы, и поэтому она оказалась столь успешной для модельного описания генерации крупномасштабного вихря. В ходе специализированных экспедиций в активные зоны циклогенеза Тихого океана в 1989 г. и 1990 г. получены данные метеорологического зондирования западной акватории Тихого океана и проверялась существующая на то время теория.

После осознания роли спиральной концепции стало ясно, что мелкомасштабная турбулентность вовсе не главный фактор, определяющий энергетику вихревой системы (хотя на некоторых этапах эволюции она играет заметную роль). Важнейший энергетический элемент тропических штормов – выделение **скрытой теплоты фазовых переходов атмосферной влаги**. Другого столь мощного энергетического источника просто нет. Для того чтобы обнаружить новую неустойчивость в основе генерации крупномасштабной вихревой структуры в атмосфере, требуется исходить из основных физических принципов термодинамики влажного воздуха. При этом учитывается скрытая теплота фазовых переходов. В ранних, примитивных моделях есть варианты “сухого” и “влажного”

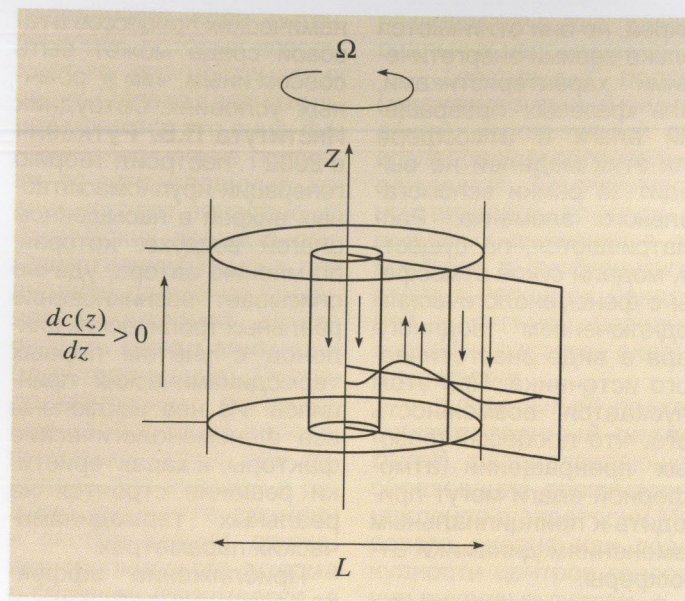
вихрей, но они отличаются только своими энергетическими характеристиками, роль фазовых превращений влаги в атмосфере для этих моделей не выходит за рамки вспомогательного элемента. Рассматриваются, по существу, модели сухой атмосферы с феноменологическим подключением водяного пара в виде энергетического источника. При этом упускается возможность того, что процессы фазовых превращений атмосферной влаги могут приводить к принципиальным изменениям динамики атмосферы.

Физическая суть такого подхода состоит в использовании термодинамики насыщенного влажного воздуха, допускающей фазовые превращения атмосферной влаги. Они приводят к появлению принципиальных изменений в динамике тропической атмосферы. Динамическая фаза процесса обусловлена аномальным поведением вертикального профиля скорости звука в насыщенном влагой воздухе. Дело в том, что в “нормальных” атмосферных условиях скорость звука (а это своего рода критический масштаб динамики физических процессов в атмосфере, подобно скорости света в электродинамике) пропорциональна температуре и с высотой падает, как и температура (вплоть до границы стратосферы). Однако в наполненных водяным паром слоях атмосферы может произойти обратный процесс – скорость звука будет возрастать с понижением температуры, и соотношение ди-

намических процессов в газовой среде может быть совсем иным, чем в “обычных” условиях. Сотрудник Института **П.Б. Руткевич** в 2002 г. построил теорию генерации крупномасштабных вихрей в насыщенном влагой воздухе, которая, по мнению автора, удачно описывает возникновение реальных тропических циклонов с учетом первых термодинамических принципов. Из нее исключены все феноменологические факторы, и характеристики решения строятся на реальных термодинамических параметрах.

Приближение эффекта несжимаемости жидкости – предельный случай в гидродинамической теории, предполагающей распространение звука с бесконечной скоростью. Все физические процессы при этом протекают без задержки. Если же учесть, что скорость звука конечна, они неизбежно будут запаздывать, и тем значительно, чем больше размеры системы. Если скорость звука возрастает с высотой, все процессы в верхней части протекают с меньшим запаздыванием, чем в нижней.

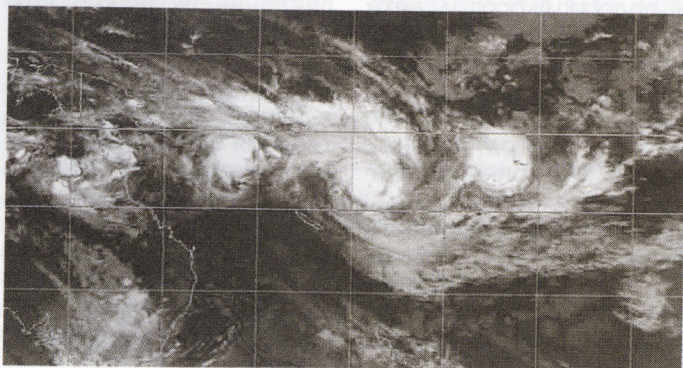
Допустим, что в области тропической атмосферы, где сильно снизилось давление, возникло возмущение. При малых амплитудах можно рассмотреть крупномасштабную ячейку. Восходящая часть течения в ней будет попадать в менее плотные слои атмосферы и испытывать разрежение, а нисходящая – сжатие. Течение в ячейке нарушит геострофический баланс (равновесие горизонтального



барического градиента и отклоняющей силы вращения Земли) рассматриваемой области, и он будет восстанавливаться за характерные периоды, соответствующие времени распространения звука в области неустойчивости.

В верхней части этой области геострофический баланс восстановится быстрее за счет различия скорости звука на разных высотах. При этом вверх восходящего потока возмущения разрежения воздуха произойдет быстрее, чем в нижней части, воз-

никнут перепад давления и тяга вверх. В нисходящем потоке ячейки возмущения она будет направлена вниз. В результате исходное возмущение усилится, и усилятся стремление воздуха в область разрежения. Таким образом, устанавливается положительная обратная связь между динамическими потоками газовой среды, которая и обуславливает неустойчивость. Если термодинамические условия нарушатся, неустойчивость может не реализоваться, в этом случае



Крупномасштабная ячейка в слабой тропической атмосфере с растущей в вертикальном направлении скоростью звука L – пространственный размер области неустойчивости, Ω – параметр Кориолиса (величина, определяющая отклоняющую силу вращения Земли), $c(z)$ – вертикальный профиль скорости звука в атмосфере на данной высоте, $dc(z)/dz$ – производная скорости звука по высоте (по П.Б. Рутвичу и Е.А. Шаркову, 2004).

в системе произойдут колебания скорости динамических потоков, вызванные инерционными волнами. При определенных термодинамических условиях формируется эффект “инерционной неустойчивости”. Именно в этом, скорее всего, причина возникновения первичной формы тропического циклона.

Рассматриваемый эффект в принципе невозможен в несжимаемой гидродинамике, закон которой подчинена окружающая человека воздушная среда. Поэтому не возможно дать пример из окружающей человека природы. Сопоставление циклона с гидродинамической воронкой, образующейся при стекании воды в ванне, или с тягой воздушного потока в печи не имеет отношения к объяснению физики вихревых структур.

ГЛОБАЛЬНЫЙ ПОДХОД

Тропический циклогенез, рассматриваемый

“Связка” трех тропических циклонов в юго-западной части Тихого океана – множественная генерация (прообраз “супертайфуна”). Изображение получено японского геостационарного спутника “GMS”. Февраль 2001. Фото NASDA.

в глобальном аспекте, пока остается слабо изученным. Но все же на основе предложенной сотрудниками ИКИ РАН концепции множественного циклогенеза уже получены серьезные и нетривиальные результаты. Очевидно, что структурным фундаментом построения временного ряда глобального тропического циклогенеза – физического процесса, рассматриваемого одновременно на всей акватории Мирового океана (или по акваториям полушарий).

Экспериментальные геофизические данные о возникновении временной и пространственной эволюции ТЦ по акваториям Мирового океана были сформированы в созданной ИКИ РАН базе данных “Глобал-ТЦ”. Там хронологические, гидрометеорологические и кинематические характеристики крупномасштабных тропических возмущений на всей акватории Мирового океана за период с 1983 г. по 2004 г. представлены в виде последовательности событий с учетом времени жизни каждого. Мониторинг тропического циклогенеза в Интернете и процедура обработки “сырых” данных по особой методике (научный препроцессинг) выполняются в Институте ежесуточно. Его сотрудники И.В. Покровская и Е.А. Шарков издали в 2001 г. принтовый вариант базы данных ТЦ, который сейчас используется в различных институтах РАН. Последующие исследования показали, что

вероятностная структура циклонических флуктуаций действительно близка к структуре потока пуассоновского типа (в котором события не зависят друг от друга и отсутствует взаимодействие между ними). Возникающий циклон ничего “не знает” о предыдущем. Но при увеличении временного масштаба наблюдения обнаружилось и отклонения от пуассоновской модели. С помощью вейвлетного анализа удалось установить: циклоны, даже те что зарождаются в разных океанах, связаны друг с другом по динамическим потокам и полям влажности. Связь очень тонкая, еле уловимая, но она существует. Система оказалась неравновесной и нелинейной.

Выявление степени неравновесности активной среды системы океан–атмосфера по отношению к генерации когерентных структур имеет экологическое значение. Последовательность индивидуальных ТЦ может обернуться глобальным синхронным катастрофическим режимом “супертайфуна”. В него сольется множество циклонов, и они заполнят всю тропическую зону. Нечто подобное происходит в атмосфере Венеры. Для жизни на Земле такая ситуация была бы губительной.

Режимы множественной генерации тропических циклонов (два-три в “связке”) обнаружены уже давно. В 1995 г. рождение циклонов в Атлантике было столь активно, что такой режим получил название “конвейера”: тогда было зафиксировано по четыре тайфуна в “связке”.

В августе 2004 г. в акватории Мирового океана в течение трех суток функционировали одновременно девять ТЦ. Но такие случаи не часты. Работы сотрудников ИКИ показали: глобальная система океан–атмосфера (в том числе и тропическая зона) находится в условиях весьма слабой неравновесности. Поэтому принципиальная перестройка обычного режима рождения тропических циклонов в глобальный синхронный катастрофический режим “супертайфуна” практически невозможна. Можно сказать, что природе в настоящее время он энергетически не нужен.

УРАГАНЫ И СОЛНЦЕ

Глобальный подход, развиваемый сотрудниками Института, дал возможность экспериментально показать существование важнейшего для термодинамики атмосферы Земли процесса ее взаимодействия с вариациями интенсивности солнечной радиации.

Солнечная энергия проникает в атмосферу в виде электромагнитного излучения и потока заряженных солнечных частиц. Земная атмосфера – сложная термоаэродинамическая система с нелинейными передаточными характеристиками. Поэтому следует предположить, что глобальный тропический циклогенез может отражать связи как с прямыми индикаторами солнечной активности, так и с индикаторами геомагнитной активности. В течение длительного времени исследователи (в том числе и А.Л. Чижевский) пытались найти корреляционные связи

Хроника познания природы тропических циклонов

Годы	Наблюдения и научные исследования
1494	Вторая экспедиция Колумба. Первое наблюдение европейцами тропического циклона.
1508	Первые целенаправленные наблюдения двух циклонов испанским моряком Понсе де Леоном.
1806	Формирование шкалы Бофорта.
1831	Циркуляционная модель тропического циклона У. Редфильда.
1831	Первые попытки создания хронологии и климатологии тропических циклонов (У. Редфильд).
1820–1840	Формирование термической и динамической гипотез возникновения тропического циклона.
1929	Первый хронологический каталог американских ураганов (Дж. Генри).
1943	Пролет самолета через стену "глаза" тайфуна.
1947	Модель цикла Карно для тропического циклона.
1960–1966	Первые спутниковые изображения тропических циклонов.
1963–1983	Программа "Stormfury" (США). Попытки активных воздействий на тайфуны.
1964	Предложение и развитие концепции условной неустойчивости второго рода (американская модель – CISK).
1970–1980	Формирование семейств признаков распознавания эволюционных стадий развития тропического циклона (методика Гидрометцентра, шкала Всемирного метеорологического центра, шкала Саффир-Симпсон, шкала Дворока).
1983	Физическая модель турбулентного динамо (структуры в спиральной турбулентности), по исследованиям Р.З. Сагдеева, С.С. Моисеева и др.
1984	Формирование автоматической системы распознавания интенсивности тропических циклонов.
1993	Модель глобального (множественного) циклогенеза (Е.А. Шарков).
1994	Формирование первичных Web-архивов региональных циклогенезов в сети Интернет.
1998	Высокоскоростная мультипликация изображений тропических циклонов по данным геостационарных ИСЗ.
1983–1999	Формирование детальной базы данных глобального циклогенеза (И.В. Покровская и Е.А. Шарков).
2002	Предложение и развитие модели вращательной неустойчивости в сжимаемой гидродинамике насыщенной атмосфере (П.Б. Руткевич).
2003	Обнаружение отклика 27-дневных вариаций солнечной активности во множественном циклогенезе (В.В. Афонин и Е.А. Шарков).

между возникновением тропических циклонов в отдельных регионах Мирового океана и солнечно-магнитосферной активнос-

тью. Эти попытки не привели к успеху, как теперь становится понятно из-за многомасштабности и нелинейности взаимодейст-

вия солнечной активности и циклогенеза. По этим причинам стандартные кросс-корреляционные подходы, используемые при обработке временных рядов наблюдаемых явлений, в принципе не могут привести к положительным результатам. И только предпринятые в самое последнее время в ИКИ по инициативе члена-корреспондента РАН Л.М. Зеленого комплексное изучение солнечно-земных связей с помощью современной спектрально-масштабной анализа, проведенное В.В. Афониним и Е.А. Шарковым, дали впечатляющие результаты. Во временных рядах глобального циклогенеза удалось обнаружить отклик на 27-дневные вариации солнечной активности в виде квазигармонического (квазисинусоидального) сигнала почти со 100% корреляцией. Получается, что солнечная активность играет роль спускового механизма при генерации тропических циклонов.

Таким образом, тропический циклогенез – проявление сложного нелинейного поведения единой термогидродинамической системы поверхность Земли – атмосфера, обладающей собственными динамическими свойствами, характерными временными масштабами и резонансными частотами.

Существенные результаты, полученные сотрудниками ИКИ в исследовании атмосферных катастроф, обусловлены его многопрофильной деятельностью. Именно широкий подход позволила приблизиться к решению ряда тонких и важных задач.



46 мега столетий жизни планеты

Н. М. АСТАФЬЕВА,
доктор физико-математических наук
Институт космических исследований РАН



Климатическая система Земли радикально менялась и развивалась на протяжении всей истории планеты. Исследования изменчивости климата опираются и на историю планеты, и на данные о ее современном состоянии. В статье рассмотрены основные этапы развития климатической системы и некоторые возможности исследования Земли из космоса. В Институте

космических исследований РАН всегда было место широкому кругу научных направлений, в частности, в Институте существуют отделы космической геофизики и исследования Земли из космоса, Лаборатория климатических исследований, Сектор динамики атмосферы и климата, в которых космические исследования тесно связаны с климатическими.

Если МЕГАСТОЛЕТИЕ ПРИНЯТЬ ЗА ГОД...

По современным представлениям, возраст Земли составляет примерно 4.6 млрд. лет. В XVIII в. полагали, что он порядка 6 тыс. лет. Исследование осадочных пород показало, что необходимое для накопления их толщ время почти на 4 порядка больше, и возраст Земли увеличился до 20–30 млн. лет. Особенно заметно Земля "повзрослела" в XX в. – до 4 млрд. лет, благодаря по-

явившимся тогда радиоизотопным методам датировки (по соотношению в породе определенных изотопов).

Мы живем в эпоху **плейстоцена четвертичного периода кайнозойской эры фанерозойского зона**. Если принять одно мега столетие (100 млн. лет) за один условный год, то возраст нашей планеты (46 мега столетий) получится равным 46 годам. В этой условной шкале времени первые (еще обезьяноподобные) люди появились 3–4 дня

назад и всего 4 ч прошло с тех пор, как Homo sapiens начал охотиться.

Возраст древнейших обнаруженных пород составляет 39 мега столетий (планете 7 лет); они относятся к ранней части **докембрийского зона** – первого крупного подразделения геологической истории Земли. Предполагаемое время появления одноклеточных форм жизни на Земле – 33 мега столетия (планете 13 лет). В период от 30-го до 10-го мега столетия (условно от 16 до

100 млн. лет = 1 год. Условная шкала времени



36 лет) происходят главные столкновения континентов. Протерозойская *Прото-Пангея*, предшественник Пангеи, существовала между 22-м и 12-м мегастолетиями. О событиях того времени можно судить по сохранившимся разрозненным остаткам древних горных систем.

Фанерозой (последние шесть лет) оказался богатым различными формами жизни. Он подразделяется на три эры (палео-, мезо- и кайнозойская), каждая из которых характеризуется своим набором жизненных

форм, почти полностью отличным от предыдущих. Можно сказать, что на Земле существовали три разных мира: мир панцирных в палеозое, мир динозавров – в мезозое и “наш”, современный мир с господством млекопитающих.

В **палеозое** жизнь бурно развивалась. Сначала – в Мировом океане (планете условно 40 лет), а затем животные вышли на сушу (к 44 годам). В это же время (примерно в 42 года) на Земле появились первые растения. Палеозой начался с возникновения

Геохронологическая шкала, отражающая геологическую историю Земли и основные этапы эволюции жизни (синяя стрелка – кайнозойский период, зеленая – мезозойский).

панцирных беспозвоночных и закончился исчезновением последних трилобитов. Рыбы, земноводные, насекомые, пресмыкающиеся и хвойные растения появились в палеозое, когда планете условно было от 40 до 44 лет.

На рубеже палеозоя и **мезозоя** начались подвижки материков – готовилось формирование последнего

пока суперконтинента Пангея, который впоследствии распадется на материки. В конце пермского периода, богатого ископаемыми формами жизни, произошло первое крупное вымирание животных, мир панцирных исчез почти полностью. Полагают, что это вызвано изменением климата, причиной которого могло стать изменение взаиморасположения суши и моря вследствие перемещения материков. Начало мезозоя ознаменовано появлением первых динозавров и млекопитающих. На границе триасового и юрского периодов Пангея постепенно распалась. За время, которое по условной шкале уложилось в предпоследний год жизни планеты, практически полностью сменился животный и растительный мир. Появились первые птицы и травянистые растения. К 45 годам Земля покрылась буйной растительностью, а среди животных господствовали динозавры и другие гигантские рептилии, вымершие в конце мелового периода. В условной шкале времени все это произошло совсем недавно, лишь 1–2 года назад.

В последний условный год **темп эволюции ускоряется**. Динозавры исчезли восемь месяцев назад (в начале кайнозойской эры). На смену им пришли более высокоорганизованные – млекопитающие, в частности обезьяны и слоны. Возникли цветковые растения, постепенно развивалась современная флора. На середину прошлой условной недели пришлось

последняя большая серия оледенений (напомним, что “малый ледниковый период” наблюдался в XV–XVI вв.). Немногим более четырех часов назад начал охотиться новый вид высокоорганизованных животных – *Homo sapiens*. Всего лишь час назад он перешел к оседлому образу жизни и занялся сельским хозяйством. Чуть больше получаса тому назад (6 тыс. лет) люди, жившие небольшими разрозненными группами, стали объединяться. Расцвет индустриальной мощи человеческого общества приходится на последнюю минуту (время жизни 3–4 поколений людей). За этот небольшой срок человечество катастрофически увеличило свою численность и интенсивность использования ресурсов планеты.

“ТЕПЛАЯ” ЗЕМЛЯ БОЛЕЕ УСТОЙЧИВА

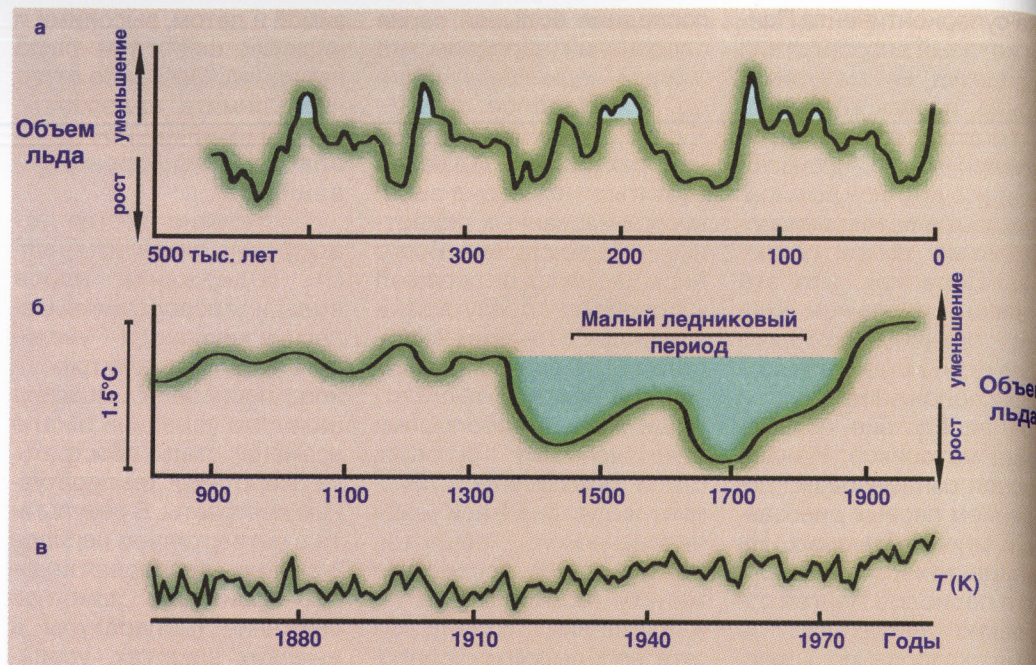
Климаты ранних времен проявлялись в условиях гораздо более плотной очень влажной атмосферы при почти полном отсутствии суши. Древние климаты реконструируются по ископаемым осадочным породам, останкам организмов и известны в общих чертах только с начала палеозоя (6 последних лет в условной шкале).

В палеозое на Земле было заметно теплее, температура экваториальной зоны мало отличалась от нынешней, но в высоких и средних широтах было гораздо теплее, а полярные шапки отсутствовали. Разница температуры между

зимой и летом, высокими и низкими широтами была невелика. Основное отличие климата палеозоя – его **изотермичность и слабая дифференцированность**.

Постепенно состав атмосферы Земли изменялся: содержание паров воды и углерода уменьшалось, а кислорода – увеличивалось. В начале третичного периода (6 месяцев назад по условной шкале времени) стали обостряться широтные температурные контрасты. В результате в четвертичном периоде (условно – последняя неделя) произошло заметное снижение температуры в высоких широтах, усилились контрастность и сезонность климата. Колебания температуры и влажности привели к **серии ледниковых эпох**.

Существует много гипотез о внутренних и внешних физических факторах, приведших к изменениям климата Земли. Например, вариации солнечной радиации (ее интенсивности и состава), непостоянство элементов земной орбиты, изменение состава атмосферы, чередование геократических (с преобладанием суши) и таллоскратических (с господством океана) периодов, перемещение полюсов, дрейф континентов и другие. Каждая из гипотез объясняет лишь некоторые детали проблемы, но ни одна из них не объясняет изменения климата полностью. В последние 5–6 тыс. лет (условно – полчаса) климат изменялся в довольно узких пределах. Теплая Зем-



ля со слабыми широтными контрастами более стабильна, чем нынешняя глобальная термодинамическая ситуация на планете.

Спектр климатических изменений очень широк — от сотен тысяч лет до межгодовых. Долговременные изменения одного из климатических параметров (объема льда) за последние 500 тыс. лет демонстрируют колебания климата на фоне квазициклической больших ледниковых периодов с характерным масштабом 100–120 тыс. лет. В последнем ледниковом периоде оказались наши далекие предки, и в настоящее время он еще не завершился. Малый ледниковый период охватил Европу в XV–XVI вв. До него, в X в., в Британии выращивали виноград. Гренландия тогда вполне оправдывала свое название “Зеле-

ная страна”. В XV в. наступило похолодание. Сейчас 1000-м толщей льда покрыто 4/5 этого самого большого острова Земли. В 40-х гг. XIX в. опять началось некоторое похолодание. Тогда многим казалось, что дальнейшее понижение температуры скажется на всем комплексе человеческой деятельности на Земле и при уменьшении средней температуры на 4°C, возможно, наступит новый ледниковый период. Однако началось потепление. Прошло не так много времени, всего полстолетия, и мы снова в панике, но теперь уже по поводу глобального потепления.

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ЗОНЫ
ЗЕМЛИ

22 столетия назад древний грек **Гиппарх из Никеи**

Изменение климатических показателей на Земле в разных временных масштабах: а — рост и уменьшение объемов льда, данным изотопного анализа, в — характер зим в Восточной Европе и изменение объема льда за последнюю 1000 лет — среднегодовая приземная температура в Северном полушарии за последние 100 лет.

(190–120 гг., II в. до н.э.) и пользовал слово **климат** его изначальном смысле **наклон** — для характеристики природных условий на планете. Он описал пять зон на Земле, природные условия в которых определяются лишь наклоном солнечных лучей к поверхности Земли. Гиппарх был гениальным астрономом. Он составил таблицы движения Солнца и Луны и каталог положений 850 звезд.

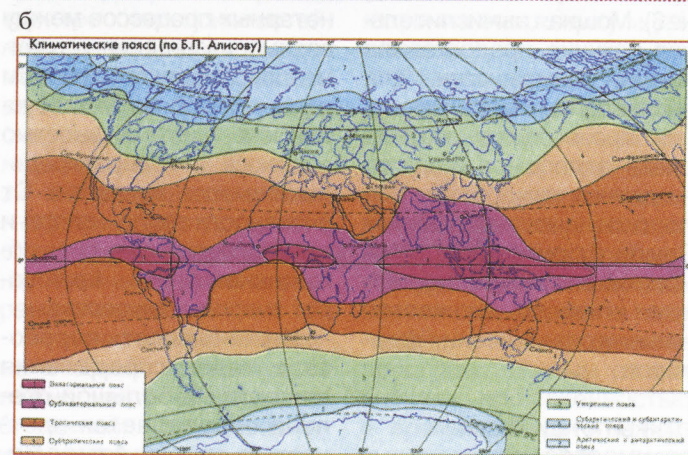
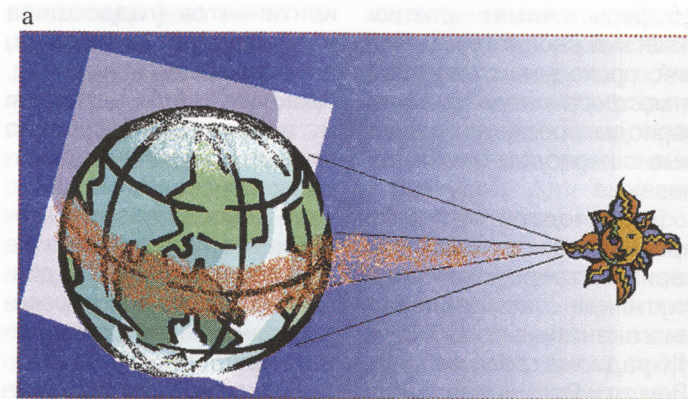
Климатические зоны Земли в представлении Гиппарха (а) и современная картина структурированных климатических зон, по Б.П. Алисову (б). На климат разных районов Земли влияет не только геофизическая широта, но и близость к океану, высота над уровнем моря и многие другие факторы.

ввел их разделение по блеску на 6 величин, открыл явление прецессии, определил наклон экватора к плоскости эклиптики с ошибкой всего в 5'. Именно Гиппарх ввел географические координаты (широту и долготу). И он же выявил основной физический фактор, определяющий климат разных широт.

Сейчас выделяют до 10 и более климатических зон. Они подробно структурированы, поскольку на климатические условия влияют не только широта, но и высота над уровнем океана, близость к нему, континентальность и другие факторы. В первом приближении, картина климатических зон сегодня — это все та же картина **пяти климатических зон Гиппарха**.

Через два тысячелетия после Гиппарха, в начале XIX в., было признано, что на климатические условия оказывают влияние Мировой океан и свойства подстилающей поверхности. Впервые об этом упомянул **А. Гумбольдт** (1769–1859) в своем труде “Космос”.

Во второй половине XVIII в. интерес к климату сильно возрос, в особенности к проблемам погоды. К тому же стал широ-



ко использоваться для передачи информации телеграф. В Лейпциге в 1872 г. состоялось совещание по унификации метеонаблюдений и обмену метеосводками по телеграфу, на котором главными метеозементами признаны измеренные у земной поверхности температура, давление, скорость, атмосферные осадки. Учреждены международная метеорологическая организация и несколько научных журналов, существующих до сих пор, в том числе “Метеорологический вестник”, основанный в России в 1891 г. и переименован-

ный в 1935 г. в “Метеорологию и гидрологию”.

На конгрессе в Варшаве (1935) был утвержден реперный ряд, и все сопоставления изменений климата рекомендовалось делать, опираясь на данные наблюдений за 30 лет. Появилось множество метеостанций во всех странах мира. Только в СССР на 1 января 1973 г. работало 4000 метеостанций и 7500 наблюдательных постов. Все это принесло свои плоды, и на совещании в Стокгольме (1974) были разработаны определения погоды и климата. **Погода** — это мгновенное состояние ат-

мосферы, **климат** – статистический ансамбль состояний, проходимых системой атмосфера–океан–суша за периоды времени, сравнимые с периодом жизни человека.

В последней четверти прошлого века появились серии метеорологических спутников с комплексами многоканальных СВЧ- и ИК-радиометров на борту (Земля и Вселенная, 1965, № 6). Мощная вычислительная техника предоставила новые возможности для численного моделирования процессов в системе океан–атмосфера и анализа данных измерений. Было осознано, что климат Земли формируется в открытой системе и подвержен влиянию множества внешних физических факторов.

ОТКРЫТАЯ СИСТЕМА ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ГЕОСФЕР

Природные условия на планете не являются неизменными даже в пределах годового цикла, несмотря на достаточно строгую периодичность вращения Земли. Их изменчивость носит характер не периодический, а циклический, отличающийся различной продолжительностью, интенсивностью и бюджетом энергии и вещества в пределах каждого цикла.

Климатическая система Земли формируется при активном участии взаимосвязанных геосфер планеты. Компоненты климатической системы – атмосфера, океаносфера, криосфера, поверхность

континентов (гидросфера и биосфера), литосфера, антропофера и, наконец, процессы обмена теплом и веществом (особенно влагой). Открытая климатическая система испытывает воздействие из окружающего пространства не только солнечной радиации, но и приливных, гравитационных, электромагнитных сил.

В сложной системе планетарных процессов между взаимосвязанными и взаимозависимыми геосферами роль каждой из них обусловлена интенсивностью переноса и перераспределения массы вещества. От активности тепло-, влаго- и массообмена зависит общепланетарный круговорот энергии и вещества.

Интенсивность переноса и перераспределения вещества в большой степени определяется плотностью среды. **Атмосфера** с ее малой плотностью особенно динамична. Метеорологические процессы наиболее интенсивны (характерная скорость ветра в струйных течениях более 100 м/с, а течений в океане – порядка 10 см/с) и играют большую роль в общепланетарном обмене энергией и веществом. При большей плотности воды процессы обмена в **Мировом океане** осуществляются медленнее, чем в атмосфере. Отсюда повышенная устойчивость процессов обмена, способствующая сохранению планетарных условий в течение длительных промежутков времени (эпохи потепления, ледниковые периоды и т.п.). Вы-

сокая плотность порождаемая земной корой обуславливает большие временные масштабы преобразований физико-географических условий, свойственных отдельным геологическим циклам развития Земли.

До суши и Мирового океана энергия Солнца доходит в среднем одинаково, однако вода вбирает на 25–50% тепла больше, чем суша на тех же широтах. Таким образом, Мировой океан поглощает в 4.4 раза больше суммарной энергии, чем суша. Кроме того, полученное сушей летом тепло расходуется зимой, а Мировой океан накапливает и перераспределяет его в течение океаносферы. За всю историю Земли в Мировом океане накоплены огромные запасы тепла.

Теплоемкость атмосферы в 4 раза меньше, чем у 10-м слоя воды в Мировом океане. В тепловом отношении Мировой океан теплее атмосферы вовлекает всего 4% накопленного Мировым океаном тепла (50-м поверхностный слой). Однако эта доля в общем балансе тепла на планете составляет 75%. В результате, несмотря на динамичность атмосферы, Мировой океан переносит тепла с экватора в полярные районы столько же, сколько атмосфера. Его влияние на глобальные термодинамические процессы и формирование климата огромно: поглощая излучение тепла и восполняя его расходование, океаносфера смягчает климат планет.

Климатическая система глобальна, но обладает пространственными неоднородностями разных масштабов, которые меняются со временем, с различными периодами – внешними (астрономическими обусловленными) и внутренними (связанными с возможными автоколебаниями системы).

Внешние длиннопериодные колебания (порядка 100, 41, 23 и 19 тыс. лет) обусловлены изменениями наклона экватора к эклиптике, эксцентриситета орбиты Земли и долготы ее перигелия – из-за возмущений движениями планет Солнечной системы. **Неизмеримо короче** колебания инсоляции, приливов и отливов (сезон, месяц, сутки).

Внутренние длиннопериодные колебания охватывают десятки и сотни тысячелетий (ледниковые эпохи), сотни (межвековые колебания) и десятки лет (внутривековые). **Короткопериодные** – 3–5-дневные процессы, глобальные колебания (от недель до месяцев, например 2-недельный цикл колебаний зональной циркуляции) и междугодичные колебания (квазидвухлетняя цикличность атмосферной циркуляции, явление Южное Колебание–Эль-Ниньо, представляющее собой наиболее отчетливый сигнал межгодовой климатической изменчивости (Земля и Вселенная, 1999, № 2).

Таким образом, сложная климатическая система обладает чрезвычайно широким спектром колебаний и требует комплексного ис-

следования всех ее компонентов.

Термодинамические процессы в системе океан–атмосфера осуществляются на фоне и под управлением внутренних и внешних энергетических источников и при воздействии природных процессов в разных геосферах планеты. Энергетические потоки и массоперенос, происходящие в широком спектре интенсивностей, пространственных и временных масштабов, связывают между собой функционирующие структуры всех геосфер планеты. Эти связи, а в результате и сами геофизические процессы, оказываются сложными, нелинейными и многопараметрическими.

При исследованиях климатической изменчивости важно найти объекты наблюдений, удовлетворяющие определенным требованиям: доступность измерений, наличие представительных данных за прошлые годы, чувствительность к климатическим изменениям, в том числе и к крупномасштабным. Наиболее подходящими индикаторами признаны температура (приземная и поверхности океана), уровень моря и распространение морского льда.

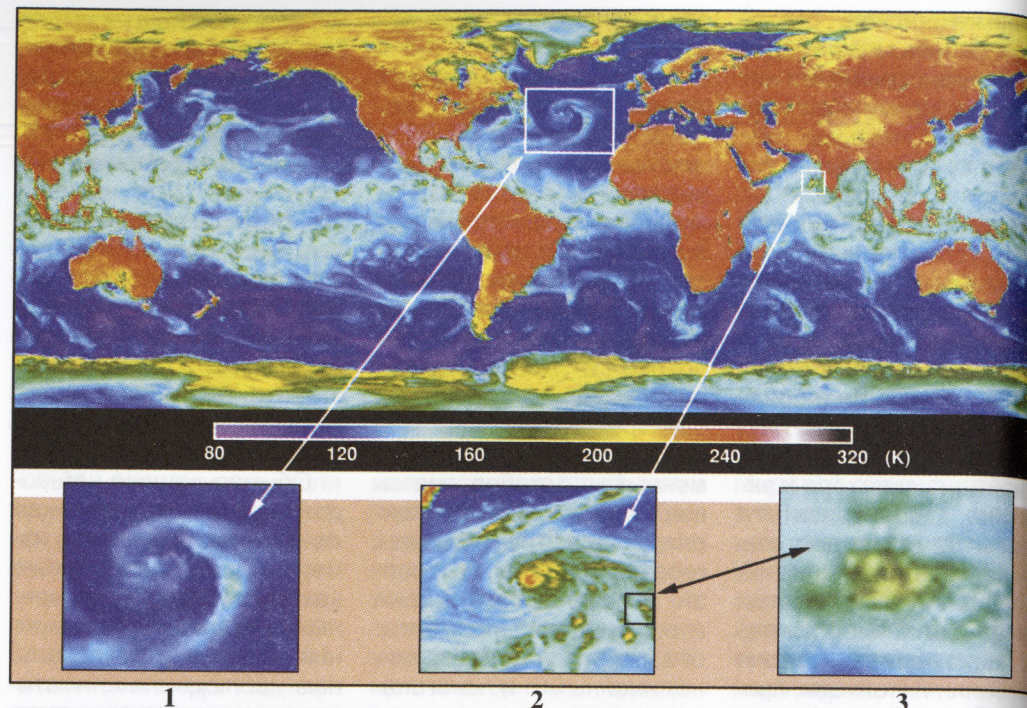
Одним из наиболее важных факторов изменчивости климата являются термодинамические взаимодействия в системе океан–атмосфера. Природные процессы, оказывающие существенное воздействие на транспортные и диссипативные свойства атмосферы и влияющие на фор-

мирование климата, имеют большую пространственную протяженность, достаточно длительны и характеризуются сложной пространственно-временной структурой. Для выявления общих закономерностей таких процессов и понимания физических механизмов, ими управляющих, необходим анализ данных наблюдений, представляющих их энергетику и динамику.

Обычно данные наблюдения усваиваются в виде **локальных** (точечных) измерений и гораздо реже как **поля** пространственных и временных измерений. Обеспечить глобальные наблюдения климатических параметров в виде полей с необходимыми пространственным разрешением, протяженностью и временной регулярностью могут приборы, установленные на искусственных спутниках Земли.

ВОЗМОЖНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В ИКИ РАН ведутся работы по двум программам, связывающим климатические и космические исследования. Их лично курирует директор Института, член-корреспондент РАН **Л.М. Зеленый**. Одна из этих программ, “Космическая погода” (Земля и Вселенная, 2004, № 5), посвящена рассмотрению влияния солнечной активности на магнитосферу, ионосферу, биосферу Земли и, в частности, изучению влияния “космической погоды”



на человека (гелиобиология). Другая программа — «Климат».

В Отделе исследования Земли из космоса в рамках темы «Климат» ведутся работы по изучению термодинамических процессов в системе океан-атмосфера, оказывающие влияние на транспортные и диссипативные свойства атмосферы и на климатическую систему в целом. Среди них — явление глобального тропического циклогенеза и Южное Колебание — Эль-Ниньо. Одна из задач Отдела — создание электронной базы данных многоканальных СВЧ-радиометрических приборов SSM/I, установленных на американских космических аппаратах F10–F15 серии метеорологических спутников в рамках про-

граммы DMSP (Defense Meteorological Satellite Programme — Оборонная программа метеорологических спутников). Это программа долговременного мониторинга Земли, имеющая целью получение глобальной метеорологической, океанографической и солнечно-геофизической оперативной информации.

На основе СВЧ-радиометрических спутниковых данных нами построены **глобальные радиотепловые поля** системы океан-атмосфера. Радиометрические спутниковые данные используются не только для восстановления количественных значений климатических характеристик на основе полуэмпирических формул, но и непосредственно как прямые характеристики теплового и ди-

Глобальное радиотепловое поле планеты, построенное в ИКИ РАН по данным метеорологических спутников F10–F15 серии «DMSP». Карта Земли в меридиональной проекции (с цветовой радиотемпературной шкалой разворот по долготе дополнен до 120°, что позволяет наблюдать структуру атмосферных процессов над акваторией каждого океана планеты. Внизу — увеличенные атмосферные структуры разных масштабов: крупномасштабный циклон средних широт (1), тропический циклон (2) и мелкомасштабная структура в циклоне (3).

намического взаимодействия океана и атмосферы. Действенность прямого использования СВЧ-спутниковых данных подтверждается на масштабах среднемесячных изменений, а также в ситуациях, когда формализация самих процессов становится

труднительной вследствие их высокой динамичности, из-за резких градиентов формирующихся в полях пространственно-временного изменения параметров.

Построенную нами **анимацию** глобального радиотеплового поля с необходимыми пояснениями можно увидеть на сайте ИКИ РАН (<http://www.iki.rssi.ru>). Анимация позволяет наблюдать подробную **структуру и эволюцию атмосферных процессов** в широком диапазоне масштабов — от сотен километров (фронтальные зоны, тропические циклоны) до планетарных масштабов квазистационарных атмосферных структур (основные депрессии, энергоактивные зоны). На наш взгляд, кроме сугубо научного интереса такая анимация может быть полезна преподавателям и учащимся школ или вузов.

РЕАЛЬНА ЛИ ОПАСНОСТЬ ГЛОБАЛЬНОЙ КАТАСТРОФЫ?

Климатическая система планеты Земля — наша среда обитания, и послед-

ствия резких изменений климата могут оказаться катастрофическими. Поэтому вполне понятно то беспокойство, которое проявляют люди, оказывающиеся перед угрозой таких изменений, настоящей или кажущейся.

В разное время подробно обсуждались проблемы, связанные с возможными изменениями климата. Например, некоторое похолодание в 40-х гг. XX в., окончившееся не новым ледниковым периодом, а потеплением. Увеличение площади озоновых дыр считали следствием полетов сверхзвуковых самолетов на больших высотах. Рост концентрации в атмосфере парниковых газов, с которым связывается глобальное потепление. Много тревог вызвало обмеление Каспийского моря, и всерьез рассматривалась задача переброски стока северных рек, но теперь Каспий входит в свои старые берега (Земля и Вселенная, 2005, № 1). Против этого проекта в свое время активно выступал первый директор ИКИ академик **Г.И. Петров**.

Можно привести и другие примеры проявления в некотором роде **антропоцентризма**. Масштабы изменчивости климата, с точки зрения истории человечества и геологического времени, несоизмеримы. Так, например, история с обмелением Каспийского моря повторялась неоднократно. Уместно привести слова британского метеоролога Х. Лэмба: «Существует опасность, что сделанные в спешке попытки предугадать климатические перемены приведут к преждевременным мерам по «усовершенствованию» или контролю климата».

Способно ли человечество раскачать такую мощную, хорошо сбалансированную и в то же время достаточно подвижную и легко подстраивающуюся систему, как наша климатическая? Можно рассмотреть вероятность настолько сильного воздействия, что Земля просто «смахнет» человечество со своей поверхности и начнет новую, несомненно успешную «игру» с континентами и жизненными формами.

В ИКИ РАН постоянно проводятся крупнейшие научные форумы. На одном из них – “Космическая наука: взгляд в будущее” – в октябре 2004 г. директор ГАИШ А.М. Черепашук выступил с интересным докладом. Ниже приводится его журнальная версия.

Космические исследования и проблема черных дыр во Вселенной

А. М. ЧЕРЕПАШУК,
член-корреспондент РАН
Государственный астрономический институт
им. П.К. Штернберга, МГУ

Мы продолжаем обсуждать экзотические и парадоксальные свойства черных дыр. Нам предстоит рассмотреть современную теоретическую модель таких объектов и ее космологические основания, а также методы обнаружения черных дыр и планируемые



специальные эксперименты для окончательного доказательства их существования. Эти надежды связаны главным образом с космическими обсерваториями, с помощью которых открыто уже свыше 300 кандидатов в черные дыры.

СВОЙСТВА ЧЕРНЫХ ДЫР

С началом космической эры появилась уникальная возможность наблюдать и исследовать во всем спектральном диапазоне самые отдаленные объекты во Вселенной. Огромный вклад в развитие фундаментальных наук внесли космические программы, выполняемые с борта научных спутников. Одна из актуальных проблем современной астро-

трофизики – обнаружение **черных дыр**, предсказанных А. Эйнштейном в его общей теории относительности (ОТО). Свойства черных дыр столь экстремальны, что в их существование верится с трудом. На протяжении десятилетий среди ученых идут ожесточенные споры о существовании черных дыр во Вселенной (Земля и Вселенная, 1972, № 2; 1975, № 6; 1986, № 2; 1992, № 3). Благодаря космиче-

ским исследованиям в настоящее время стало возможным вплотную приблизиться к решению этой важнейшей проблемы современного естествознания.

Под черной дырой понимается область пространства – времени, гравитационное поле которой столь сильно, что из нее даже свет не может вырваться. Чтобы преодолеть притяжение небесного тела необходима вторая ко-

смическая скорость, например для Земли она составляет 11.2 км/с, для черной дыры – равна скорости света в вакууме ($c = 3 \times 10^5$ км/с). Если сжать нашу планету в четыре раза, то вторая космическая скорость возрастет вдвое. При сжатии Земли до размеров черной дыры, характеризуемой гравитационным радиусом, радиус Земли уменьшится с 6370 км до 9 мм, а вторая космическая скорость увеличится до скорости света (Земля и Вселенная, 1969, № 1).

О “темных” звездах, у которых гравитационное притяжение столь сильно, что свет не может вырваться наружу, писали еще Дж. Митчелл и П. Лаплас в конце XVIII в. Однако строгое определение черной дыры (этот термин ввел американский ученый Дж. Уиллер в 1968 г.) дано уже после того, как немецкий ученый К. Шварцшильд (1915 г.) получил точное решение уравнений ОТО для гравитационного поля сферического невращающегося тела. В это решение один из параметров уравнения – **гравитационный радиус** (r_g) – вошел как фундаменталь-

ный:
$$r_g = \frac{2GM}{c^2},$$
 где M – масса объекта, G – гравитационная постоянная, c – скорость света. Для Земли величина $r_{г.д.} = 9$ мм (3 км – для тела массой $1 M_\odot$), $r_g = 40$ а.е., $M = 2 \times 10^9 M_\odot$. Физическая граница черной дыры – **горизонт событий** (Земля и Вселенная, 1977, № 5; 2004, № 1). Все собы-

тия, происходящие под горизонтом событий, недоступны внешнему далекому наблюдателю, а на нем ход времени для далекого наблюдателя останавливается. Радиус горизонта событий (r_h) равен гравитационному радиусу в случае невращающейся (шварцшильдовской) черной дыры и $r_h < r_g$ – для вращающейся черной дыры, у которой горизонт событий погружен внутрь **эргосферы**, где существует вихревое гравитационное поле. Следует подчеркнуть, что горизонт событий – это не какая-то твердая наблюдаемая граница, а лишь **световая поверхность**. Горизонт событий может быть устранен выбором соответствующей системы отсчета. Например, для наблюдателя, свободно падающего на черную дыру, горизонт событий отсутствует.

Столь экзотические и парадоксальные свойства черной дыры у многих ученых вызывают сомнения в реальности существования таких объектов. Между тем современные астрономические наблюдения заставляют склоняться к мысли, что черные дыры, по-видимому, существуют. К настоящему времени открыто несколько сотен массивных и чрезвычайно компактных объектов с характеристиками, очень похожими на свойства черной дыры.

Немного истории

Возможность наблюдать черные дыры предсказана Я.Б. Зельдовичем (СССР) и Е.Е. Сальпите-

ром (США) в 1964 г. Выдающиеся ученые независимо опубликовали работы, в которых предположили условия мощного выделения энергии при несферической **аккреции** (выпадение) вещества на черную дыру. Скорость вещества при аккреции вблизи горизонта событий близка к световой. Столкновение и взаимное трение высокоскоростных потоков газа при аккреции приводят к их разогреву до сотен миллионов кельвинов и мощному выделению энергии в виде квантов рентгеновского излучения с длиной волны порядка $1 \text{ \AA}$ (10^{-10} м). Оно возникает при очень высокой температуре, оптическое излучение находится в диапазоне $3.5\text{--}7 \times 10^{-7}$ м. Земная атмосфера непрозрачна для рентгеновских лучей, поэтому только с космических обсерваторий можно наблюдать рентгеновские источники излучения.

Первый рентгеновский источник, Скорпион X-1, расположенный за пределами Солнечной системы, открыт с борта американской ракеты “Аэробы” в 1962 г. Руководил экспериментом Риккардо Джинаккони, удостоенный за работы в области рентгеновской астрономии в 2002 г. Нобелевской премии. Систематические исследования рентгеновских источников, в большинстве случаев это **аккрецирующие нейтронные звезды** и черные дыры, начались в 1972–1973 гг. на американской рентгеновской обсерватории “Uhuru” (“Эксплорер-42”, запущен-

на в 1970 г., научный руководитель — Р. Джаакони). Обнаружено около 100 компактных рентгеновских источников в двойных звездных системах, названных **рентгеновскими двойными** (Земля и Вселенная, 1982, № 1; 1985, № 1). Они состоят из нормальной звезды (донора) и нейтронной звезды или черной дыры, находящейся в режиме аккреции вещества. Этим открытиям в области рентгеновской астрономии предшествовала серия теоретических работ отечественных и зарубежных ученых, посвященных исследованию наблюдаемых проявлений аккрецирующих нейтронных звезд и черных дыр. Благодаря им удалось быстро понять природу рентгеновских двойных источников. Перечислим важнейшие пионерские теоретические работы в этой области.

1964 г. — предсказано мощное энерговыделение при несферической аккреции вещества на черную дыру (Я.Б. Зельдович, Е.Е. Сальпирер);

1966 г. — предложен метод поиска черных дыр по движению оптических звезд в двойных системах (Я.Б. Зельдович, О.Х. Гусейнов); предсказано рентгеновское излучение от аккрецирующих черных дыр в двойных системах (Я.Б. Зельдович, И.Д. Новиков);

1967 г. — высказана гипотеза, что рентгеновский ис-

точник Sco X-1 в созвездии Скорпиона — аккрецирующая нейтронная звезда в двойной системе (И.С. Шкловский);

1969 г. — рассмотрена аккреция на одиночную немагнитную нейтронную звезду (Я.Б. Зельдович, Н.И. Шакура); изучена аккреция на одиночную нейтронную звезду с магнитным полем (Г.С. Бисноватый-Коган, А.М. Фридман);

1971 г. — рассмотрена аккреция на одиночную черную дыру, движущуюся в межзвездной среде (В.Ф. Шварцман);

1972 г. — впервые рассчитана дисковая аккреция вещества на черную дыру в двойной системе (Н.И. Шакура); предсказана быстрая квазипериодическая переменность рентгеновского излучения от аккрецирующих черных дыр (Р.А. Сюняев); рассмотрена дисковая аккреция на релятивистский объект (Дж. Прингл, М. Рис);

1973 г. — построена теория дисковой аккреции вещества на черную дыру (в том числе в сверхкритическом режиме), рассчитан спектр рентге-

новского излучения с учетом эффектов комптонизации; предложена стандартная модель α -диска; эта работа ныне одна из самых цитируемых в физической и астрономической научной литературе (Н.И. Шакура, Р.А. Сюняев). Построена теория дисковой аккреции на черную дыру с учетом эффектов Оггера (И.Д. Новиков, К. Торн).

Все перечисленные работы выполнены до начала систематических исследований компактных рентгеновских источников с борта специальных космических обсерваторий. Сделанные в них предсказания блестяще подтверждались в ходе систематических наблюдений рентгеновских источников 1970-х гг. Последующие пуски космических рентгеновских обсерваторий (например, "HEAO-2", "Ginga", "Рентген" на модуле "Квант" станции "Мир", "Гранат", "Rosat", "ASCA", "RXTE", "Chandra", "Integral" и др.; Земля и Вселенная, 2005, № 3) привели к

обнаружению более тысячи рентгеновских двойных систем и поставили поиск черных дыр на прочный наблюдательный базис.

Массы черных дыр определяются по движению "пробных тел" (звезд, газовых облаков, газовых дисков) в их гравитационном поле. Поскольку характерные расстояния, как правило, весьма велики — много больше величины гравитационного радиуса, для определения масс черных дыр достаточно использовать закон тяготения Ньютона. Таким образом, сразу после открытия рентгеновских двойных систем остро встала задача их оптического отождествления и изучения движения оптических компонент (нормальных звезд) методами классической наземной астрономии.

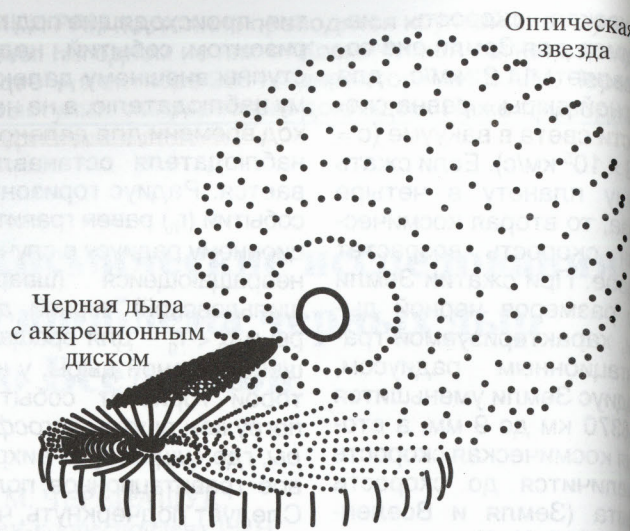
Здесь тоже, по-видимому, уместно напомнить о первых оптических отождествлениях рентгеновских двойных систем и исследованиях их оптических проявлений в 1972–1973 гг.: системы Геркулес X-1 с оптической переменной звездой HZ Геркулеса (Н.Е. Курочкин); интерпретация оптической переменности системы HZ Геркулеса как "эффекта отражения" — прогрева оптической звезды мощным рентгеновским излучением аккрецирующей нейтронной звезды (А.М. Черепашук, Ю.Н. Ефремов, Н.Е. Курочкин, Н.И. Шакура, Р.А. Сюняев, Дж. Бахколл и Н. Бахколл); первая спектроскопическая оценка функции масс рентгеновской двойной системы Лебедь X-1 [$f_x(m) = 0.2 M_\odot$] — "кандидата № 1" в

черные дыры (Л. Вебстер, П. Мурдин); обнаружен эффект эллипсоидальности нормальной звезды по оптической переменности системы Лебедь X-1 (масса черной дыры $m_x > 5.6 M_\odot$), сделана оценка наклона орбиты и массы "кандидата № 1" в черные дыры (В.М. Лютий, Р.А. Сюняев, А.М. Черепашук). Эффекты "отражения" и эллипсоидальности оказались типичными оптическими проявлениями рентгеновских двойных систем. Они широко используются при отождествлении в видимом диапазоне рентгеновских двойных систем и определении масс черных дыр в двойных системах.

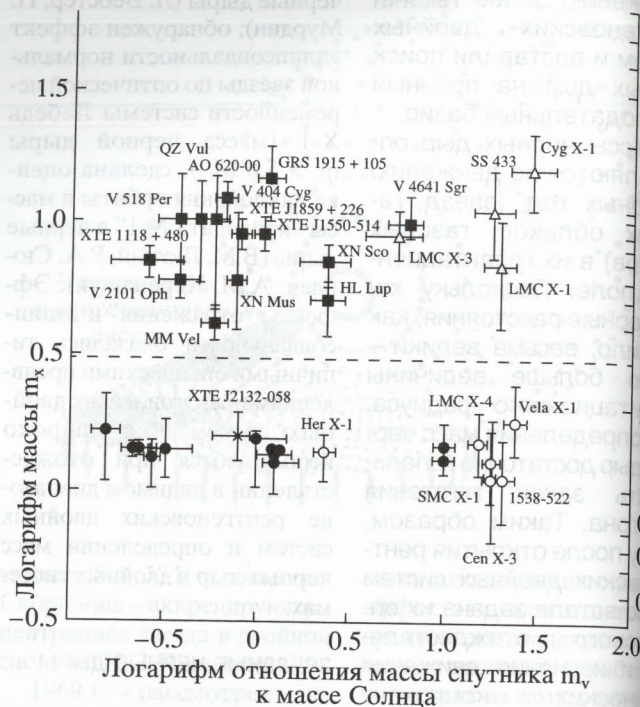
ЗВЕЗДНЫЕ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

К настоящему времени измерены массы двух десятков звездных черных дыр ($m_x = 4\text{--}15 M_\odot$). Как известно, черные дыры звездной массы образуются при коллапсах (сильном сжатии) ядер массивных звезд. Масса ядер звезд, претерпевших термоядерные превращения, должна быть менее $1.4 M_\odot$, чтобы образовался **белый карлик**, удерживаемый от сжатия давлением вырожденного электронного газа. Радиус белого карлика — 10^4 км, масса — около $1 M_\odot$, средняя плотность $\rho = 1 \text{ г/см}^3$ (10^9 кг/м^3). Если масса ядра звезды в конце эволюции $1.4 < m_c < 3 M_\odot$, то образуется **нейтронная звезда** (Земля и Вселенная, 1985, № 2; 2000, № 2). Радиус нейтронной звезды близок к 10 км, масса — $1.4 M_\odot$, средняя плотность — 10^{17} –

10^{18} кг/м^3 ($10^8\text{--}10^9 \text{ Т/см}^3$). Если же масса ядра звезды превышает $3 M_\odot$, то, согласно ОТО, в результате коллапса ядра образуется черная дыра. Гравитационный радиус (r_g) черной дыры массой $10 M_\odot$ составляет 30 км. Чтобы убедиться, что открыта именно черная дыра, нужно измерить массу компактного объекта, показать, что его радиус не превышает гравитационного (r_g), а также получить наблюдательные свидетельства того, что у объекта нет наблюдаемой поверхности, а есть лишь горизонт событий (световая поверхность). Массы черных дыр в рентгеновских двойных системах определяются по движению оптических звезд. Результаты спектроскопических исследований доплеровских сдвигов линий в спектре оптической звезды позволяют построить кривую лучевых скоростей и измерить функцию масс оптической звезды $f_v(m)$, которая является абсолютным нижним пределом для массы черной дыры. Поскольку компоненты рентгеновской двойной не видны раздельно, для однозначного определения массы черной дыры (m_x) из функции масс $f_v(m)$ необходимо оценить два свободных параметра: отношение масс компонент ($q = m_x/m_v$) и наклон орбиты (i) системы к плоскости, перпендикулярной лучу зрения (из дополнительных наблюдательных данных). Фотометрические наблюдения помогают построить оптическую кривую блеска



Зависимость масс нейтронных звезд и черных дыр (m_x) от масс спутников в двойных системах (m_s). Релятивистские объекты распределены выше и ниже $3 M_\odot$: темные квадраты – черные дыры в рентгеновских новых, светлые треугольники – черные дыры в квазистационарных рентгеновских двойных системах с оптическими спутниками – массивными горячими звездами, темные кружки – радиопульсары, светлые – рентгеновские пульсары, крестик – рентгеновский барстер первого типа.



рентгеновской двойной и по амплитуде эффекта эллипсоидальности определить наклонение орбиты (метод предложен в 1973 г. В.М. Лютым, Р.А. Сюняевым и А.М. Черепашуком). Спектральные наблюдения с высоким разрешением позволяют измерить доплеровское расширение линий поглощения в спектре оптической звезды, обусловленное ее вращением, что необходимо для оценки отношения масс (q). Существуют и другие методы выявления параметров q и i, например на основе информации о расстоянии до двойной системы, орбитальной переменности профилей линий в спектре оптической звезды (зависимости профилей линий от фазы орбитального периода). Итак, сегодня найдены способы определения массы звездных черных дыр, связанные с наземными спектральными и фотометрическими наблюдениями рентгеновских двойных систем.

С другой стороны, рентгеновские наблюдения с высоким временным разрешением позволяют изучать быструю иррегулярную и квазипериодическую рентгеновскую переменность кандидатов в черные дыры и оценивать их характерные размеры. Оказалось, что размеры объектов не больше нескольких гравитационных радиусов, то есть очень малы. Нет пока прямых свидетельств, что у кандидатов в черные дыры существуют горизонты событий. Кроме того, не удается точно определить размеры этих объектов, а можно дать лишь верхние пределы для них, в несколько раз превышающие их гравитационные радиусы. По-

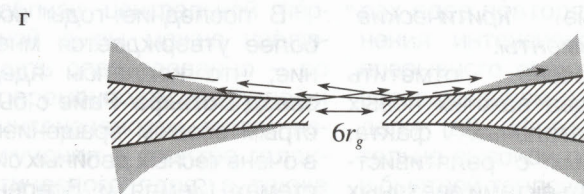
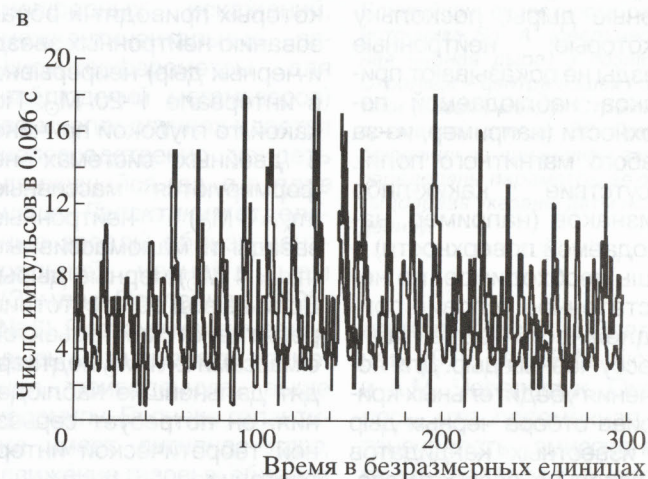
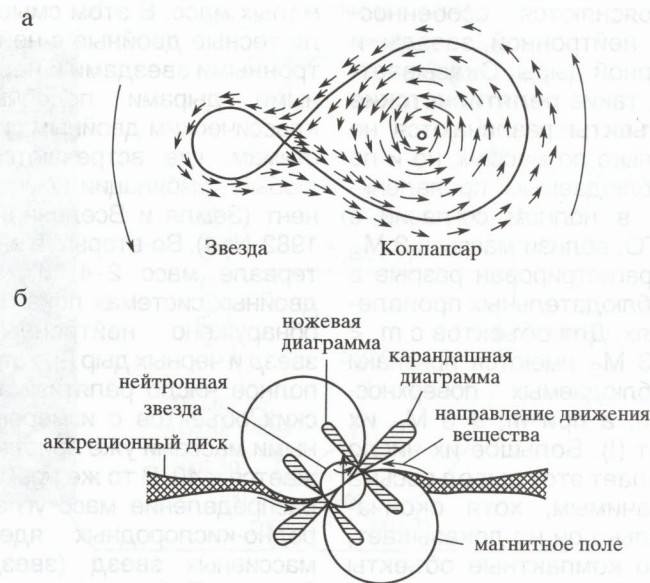
этому окончательные доказательства существования звездных черных дыр пока не получены. В настоящее время известно 20 массивных и компактных объектов – кандидатов в звездные черные дыры, обладающих всеми необходимыми свойствами черных дыр.

У нейтронных звезд фиксированы явные признаки наблюдаемой поверхности. Феномен радиопульсара связан с вращением нейтронной звезды, которая через сильное (около 10^{12} Гс) магнитное поле перерабатывает энергию в направленное радиационное излучение. Эти процессы могут реализоваться лишь при наличии твердой наблюдаемой поверхности

Падение вещества на нейтронную звезду и черную дыру во внутренних частях аккреционного диска (стрелками показано направление движения системы или вещества): а) модель рентгеновской двойной системы (вид сверху); б) схематическое изображение быстро вращающейся нейтронной звезды с сильным магнитным полем, излучающей в режиме рентгеновского пульсара; в) рентгеновское излучение пульсара Her X-1 в Геркулесе с постоянным периодом (1.27 с) на протяжении 30 лет и фазами пульсаций рентгеновского излучения; г) схема внутренней части аккреционного диска у черной дыры (от нее можно ожидать нерегулярной переменности рентгеновского излучения с периодом 10^{-3} – 10^{-4} с).

нейтронной звезды. Рентгеновский пульсар представляет собой сильно намагниченную нейтронную звезду с быстрым осевым вращением и аккрецией вещества на ее магнитные полюса. В этих местах образуются горячие рентгеновские пятна, из-за эффекта маяка приводящие к строго периодичной, характерной для пульсаров, рентгеновской переменности. Рентгеновский барстер первого типа (мощные вспышки с периодом 1–10 с) образуется в результате термоядерных взрывов вещества на поверхности нейтронной звезды со слабым магнитным полем, накопленного в процессе аккреции.

Во всех случаях, когда у компактного объекта (нейтронной звезды) обнаруживаются признаки наблюдаемой поверхности, его масса не превосходит $3 M_\odot$ (!). В то же время ни один из 20 массивных



($m_x > 3 M_\odot$) компактных рентгеновских источников (кандидатов в черные дыры) не проявляет признаков радиопульсара, рентгеновского пульсара или рентгеновского бар-

стера первого типа, то есть у кандидатов в черные дыры не обнаруживаются следы наблюдаемой поверхности.

По мере накопления наблюдательных данных

проявляются особенности нейтронной звезды и черной дыры. Оказываются, такие **релятивистские объекты** различаются не только по массам, но и по наблюдаемым проявлениям в полном согласии с ОТО: вблизи массы в $3 M_{\odot}$ зарегистрирован разрыв в наблюдательных проявлениях. Для объектов с $m_x < 3 M_{\odot}$ имеются признаки наблюдаемых поверхностей, а при $m_x > 3 M_{\odot}$ их нет (!). Большое их число делает этот вывод весьма значимым, хотя окончательно он не доказывает, что компактные объекты с $m_x > 3 M_{\odot}$ — обязательно черные дыры, поскольку некоторые нейтронные звезды не показывают признаков наблюдаемой поверхности (например, из-за слабого магнитного поля). Отсутствие каких-либо признаков (например, наблюдаемой поверхности) — лишь необходимое, но недостаточное условие принадлежности объекта к классу черных дыр. Для получения убедительных критериев отбора черных дыр из известных кандидатов желательно провести специальные **“критические” эксперименты**.

Интересно отметить также два важных новых наблюдательных факта, связанных с релятивистскими объектами звездных масс. Во-первых, не найдена зависимость между массами релятивистских объектов и их спутников в рентгеновских двойных: нейтронные звезды и черные дыры встречаются в таких системах со спутниками как больших, так и

малых масс. В этом смысле тесные двойные с нейтронными звездами и черными дырами подобны классическим двойным системам, где встречаются любые комбинации компонент (Земля и Вселенная, 1982, № 4). Во-вторых, в интервале масс $2-4 M_{\odot}$ в двойных системах пока не обнаружено нейтронных звезд и черных дыр (!), хотя полное число релятивистских объектов с измеренными массами уже приближается к 40. В то же время распределение масс углеродно-кислородных ядер массивных звезд (звезд Вольфа–Райе, коллапсы которых приводят к образованию нейтронных звезд и черных дыр) непрерывно в интервале $1-20 M_{\odot}$. По какой-то глубокой причине в двойных системах не формируются массивные ($m_x \sim 3 M_{\odot}$) нейтронные звезды и маломассивные ($m_x < 4 M_{\odot}$) черные дыры. Если вывод об отсутствии релятивистских объектов с массами $2-4 M_{\odot}$ подтвердят дальнейшие наблюдения, он потребует серьезной теоретической интерпретации.

В последние годы все более утверждается мнение, что коллапсы ядер **звезд Вольфа–Райе** с быстрым осевым вращением в очень тесных двойных системах (Земля и Вселенная, 1991, № 5; 1994, № 2) приводят к образованию предельно быстро вращающихся (**керровских**) черных дыр в галактиках. Они могут быть источниками пока загадочных **космических гамма-всплесков**, в которых за несколько се-

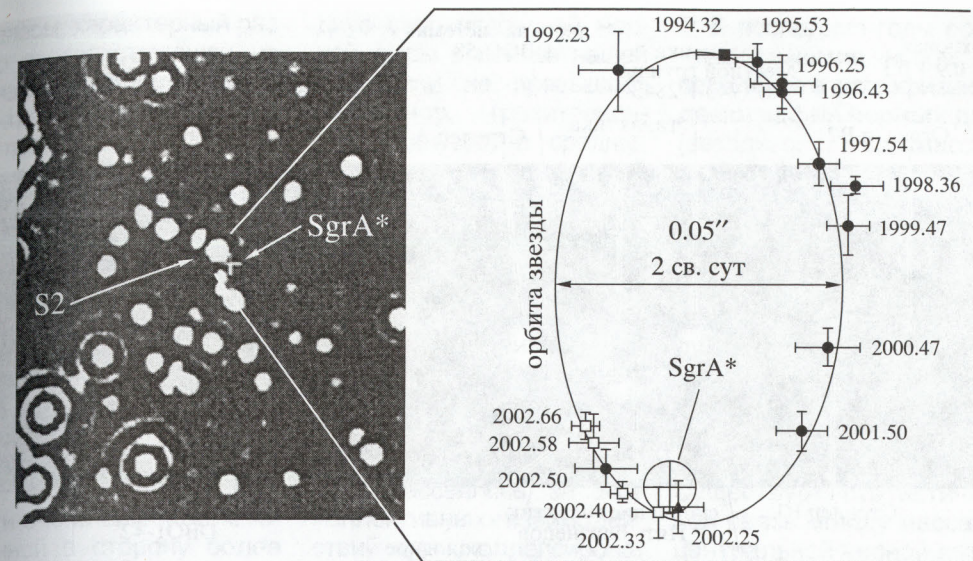
кунд выделяется гигантская энергия (до 10^{46} Дж или 10^{53} эрг), эквивалентная значительной доле массы Солнца (Земля и Вселенная, 1999, № 5). Оценки, основанные на наблюдательных данных, показывают, что полное число черных дыр звездной массы в Галактике близко к 10^7 . При среднем $M_{ч.д.} = 10 M_{\odot}$, в черных дырах содержится около $10^8 M_{\odot}$, или 0.1% от массы видимого (барионного) вещества галактики. Это настолько значительная величина, что можно говорить о новом состоянии материи в Галактике **коллапсирующем** (наряду с твердым, жидким, газообразным и плазменным).

СВЕРХМАССИВНЫЕ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ В ЯДРАХ ГАЛАКТИК

Галактики в большинстве случаев имеют в центральных частях компактные сгущения газа и звезд, называемые ядрами. К настоящему времени измерены массы примерно 300 черных дыр в ядрах галактик с $M = 10^6-10^9 M_{\odot}$. Впервые массы сверхмассивных черных дыр оценены в **квазарах** (очень активных ядрах галактик) Я.Б. Зельдовичем и И.Д. Новиковым в 1964 г. Сравнивались наблюдаемая светимость квазара (10^{40} Дж/с или 10^{47} эрг/с) и критическая эддингтоновская светимость, при которой давление радиации уравновешивает силу гравитационного притяжения. Оказалось, что массы черных дыр в квазарах превышают $10^8 M_{\odot}$ (Земля и Вселенная, 1968, № 3; 1980, № 3; 1994, №№ 3–5). Массы черных дыр в ядрах галактик определяются из предположения о том, что сверхмассивные черные дыры контролируют своим гравитационным полем движение облаков газа и звезд вблизи центра галактики. Если измерены скорость (v) движения газового облака или звезды и расстояние (r) от черной дыры до “пробного тела”, то, применяя закон тяготения Ньютона, получим массу центральной черной дыры: $m_{ч.д.} = \frac{\eta v^2 r}{G}$, где

G — постоянная тяготения; η — параметр (меняется от 1 до 3), учитывающий характер движения “пробных тел” (для круговых движений $\eta = 1$).

С помощью современных наблюдательных средств (КТХ, крупнейшие 8–10-м наземные оптические и ИК-телескопы с системами компенсации ат-



мосферных искажений, межконтинентальные радиоинтерферометры для наблюдений мегамазеров) во многих случаях удастся непосредственно увидеть движущийся газ, а в **ядре нашей Галактики** и отдельные звезды вблизи центральной черной дыры (Земля и Вселенная, 1997, № 6). Поэтому массу черной дыры можно узнать, применяя приведенную выше формулу. Если же галактика имеет **активное ядро**, движение газовых облаков вблизи центральной черной дыры можно наблюдать опосредованно — по переменности профилей и интенсивности линий излучения в спектре галактического ядра, а также по **эффекту запаздывания** переменности эмиссионных линий излучения в спектре галактического ядра относительно его непрерывного спектра. Эффект запаздывания впервые обнаружили в 1972 г. для ядер **сейфертовских га-**

Ближайшие окрестности радиоисточника SgrA* (сверхмассивная черная дыра) в созвездии Стрельца — центра нашей Галактики (слева). Вокруг Стрельца A вращается звезда S2. При наблюдении за движением звезды определены параметры ее орбиты (справа указаны даты наблюдения).

лактик (Земля и Вселенная, 1970, № 3) В.М. Лютый и А.М. Черепашук. Оказалось, что переменная интенсивность эмиссионных линий водорода в спектрах ядер повторяет изменения интенсивности непрерывного спектра, но с запаздыванием на 1–4 недели (Δt). Из-за сравнительно высокой плотности и быстрой тепловой релаксации плазмы в облаках время запаздывания может рассматриваться как длительность пролета ионизирующей радиации от нестационарного центрального источника (ближайших окрестностей аккрецирующей центральной



Центр Млечного Пути. Обнаружено несколько нейтронных звезд и черных дыр, галактики Местной группы и газовые облака, собравшиеся вокруг сверхмассивной черной дыры Стрелец А в созвездии Стрельца. Изображение в рентгеновском диапазоне получено в 2004 г. с высоким угловым разрешением космической обсерваторией "Chandra" (NASA).

черной дыры) до "пробных тел" — газовых облаков, излучающих в эмиссионных линиях. Можно рассчитать расстояние (r) от центральной черной дыры до газовых облаков: $r = c \times \Delta t$. Средняя скорость (v) газовых облаков оценивается по доплеровскому расширению линий излучения в их спектре, а масса центральной черной дыры — по приведенной выше формуле. С помощью такого метода (эхокартирование)

определены массы многих десятков черных дыр в ядрах активных галактик: 10^7 – $10^8 M_{\odot}$. Ядро нашей Галактики расположено гораздо ближе к нам, чем ядра других галактик, поэтому удастся различить отдельные звезды и детально изучать их движение около центральной черной дыры, что дает наиболее надежную оценку ее массы (Земля и Вселенная, 1978, № 6). Свыше 10 лет при наблюдении в ИК-диапазоне ядра Галактики немецкие и американские ученые применяют систему компенсации атмосферных искажений. Орбитальный период вращения звезды S2 вокруг центральной черной дыры в ядре нашей Галактики оказался 15.2 года, минимальное расстояние от центральной черной дыры — 120 а.е., что лишь в три раза больше радиуса Солнечной системы

и составляет около 2 тыс. гравитационных радиусов. По третьему закону Кеплера определена масса центральной черной дыры — $3.7 \times 10^6 M_{\odot}$.

В ряде случаев возможны ограничения размеров сверхмассивных компактных объектов. Например, прямые наблюдения ядра галактики M87 в созвездии Девы (расстояние 60 млн. св. лет) методом межконтинентальной радиоинтерферометрии на длине волны 7×10^{-3} м с разрешением 10^{-4} секунды дуги показали, что радиус центральной черной дыры массой $3 \times 10^9 M_{\odot}$ не превышает 30 гравитационных радиусов. В ядрах некоторых активных галактик обнаружена быстрая переменность в оптическом и рентгеновском диапазонах от десятков минут до суток (Земля и Вселенная, 1990, № 4). Таким

образом, характерный размер соответствующей излучающей области вблизи центральной черной дыры не превышает нескольких гравитационных радиусов. Важные косвенные ограничения на радиусы сверхмассивных черных дыр следуют из анализа сложного профиля рентгеновской линии 24-кратно ионизованного железа (энергия 6.4 кэВ). В ряде случаев эта линия состоит из двух компонент — узкой, имеющей лабораторную частоту, и очень широкой, смещенной в сторону более низких частот. Ширина смещенной компоненты линии соответствует скорости вращения горячей плазмы вблизи центральной черной дыры — около 10^5 км/с, а величина "красного" смещения свидетельствует о ее формировании вблизи центральной черной дыры на расстоянии менее трех гравитационных радиусов (!). Недавно с помощью американской рентгеновской обсерватории "Chandra" (Земля и Вселенная, 2000, № 4) обнаружено значительное изменение интенсивности рентгеновского излучения ядра Галактики с временем вплоть до 10 мин. Определен размер области вблизи центральной черной дыры, излучающей рентгеновский поток $r = c \times \Delta t \leq 20 r_g$. Еще более жесткие ограничения на радиус центральной черной дыры в ее ядре следуют из анализа квазипериодической переменности (17 мин) ядра в ИК-диапазоне. Эти данные подтверждают, что ра-

диус сверхмассивной черной дыры в центре нашей Галактики не превышает нескольких гравитационных радиусов, а средняя плотность вещества в ней столь велика, что если бы в ее центре находилась не сверхмассивная черная дыра, а скопление отдельных "темных тел" (белых карликов низкой светимости, нейтронных звезд, звездных черных дыр), то оно в течение десятков тысяч лет испарилось (рассеялось) за счет коллективных взаимодействий или сколлапсировало в сверхмассивную черную дыру. Поскольку возраст Галактики оценивается в 10^{10} лет, то модель сверхмассивного компактного объекта в ее центре в виде скопления отдельных маломассивных объектов должна быть отвергнута.

Таким образом, длительные наблюдения нашей Галактики выявили, что сверхмассивный компактный объект в ее центре представляет собой не скопление звезд, а единое тело. Если это не черная дыра, то что? Будущие "критические" эксперименты позволят окончательно доказать наличие черной дыры в центре нашей Галактики. Отметим, что в настоящее время среди астрономов складывается убеждение: в центре каждой галактики есть сверхмассивная черная дыра с массой от 10^6 до $10^9 M_{\odot}$. Черные дыры меньших масс, возможно, также находятся в центрах некоторых галактик, но их пока трудно обнаружить современными методами.

В последние годы получило развитие новое направление в астрофизике — **демография черных дыр** (звездных и сверхмассивных), изучающее статистические свойства черных дыр и их связь с другими объектами Вселенной. В частности, обнаружен ряд важных корреляций между характеристиками сверхмассивных черных дыр и свойствами родительских галактик (Земля и Вселенная, 2003, № 6). Существует статистическая связь между массами центральной черной дыры и *балджа галактики* (сферическое сгущение старых звезд с большой дисперсией скоростей в центральной части галактики): $M_{ч.д.} = 1.2 \times 10^{-3} M_{балдж}$. Эта почти линейная зависимость показывает, что в диапазоне масс (10^6 – 10^{10}) масса центральной черной дыры составляет 0.12% от массы балджа, тем самым накладываясь ограничения на механизмы формирования сверхмассивных черных дыр в ядрах галактик. Масса черной дыры — это функция разброса скоростей звезд балджа (σ): $M_{ч.д.} \sim \sigma^4$. Недавно установлено, что масса центральной черной дыры примерно пропорциональна массе *гало* галактик, состоящих, возможно, в основном из "темной материи". Представляет интерес гипотеза академика А.В. Гуревича с соавторами о том, что в процессе эволюции *гало* галактики в ее центре образуется глубокая потенциальная яма (*касп*), куда падает обычное барионное вещество, при этом масса

сверхмассивной черной дыры возрастает. Последние исследования (А.В. Засов, Л.Н. Петроченко, А.М. Черепашук) показали, что связь между массами центральной черной дыры и балджем Галактики значительно сильнее, чем связь между массами черных дыр и галактического гало. У галактик с одной и той же максимальной скоростью вращения масса центральной черной дыры тем больше, чем больше масса балджа галактики. Все эти наблюдаемые закономерности имеют значение для построения адекватной теоретической модели формирования сверхмассивных черных дыр в ядрах галактик. Сейчас ученые в России и за рубежом трудятся над ее разработкой.

“КРИТИЧЕСКИЕ” ЭКСПЕРИМЕНТЫ

К настоящему времени **близка к решению проблема поиска черных дыр во Вселенной.** Необходимые условия, накладываемые ОТО на проявления аккрецирующих черных дыр, выполняются для всех известных кандидатов в черные дыры. Это укрепляет нашу уверенность в реальности черных дыр, хотя не может служить доказательством их существования. Для получения достаточных критериев отбора черных дыр из найденных кандидатов и **окончательного доказательства их подлинности** планируется проведение специальных экспери-

ментов. Перечислим важнейшие из них.

1. **Цикл наблюдений черных дыр в ядрах ближайших галактик с разрешением 10^{-7} секунды дуги с помощью космического рентгеновского интерферометра** (американский проект “Constellation-X”, запуск планируется в 2014 г.). Напомним, что из-за огромных масс черные дыры в ядрах галактик имеют размеры более 10^{-6} угловых секунд (например, в центре нашей Галактики – 6×10^{-6} угловых секунд, а в ядре галактики Андромеды – 3×10^{-6} угловых секунд). Космический рентгеновский интерферометр сможет измерить радиус сверхмассивной черной дыры или, по крайней мере, радиус последней устойчивой орбиты вблизи черной дыры (для шварцшильдовской черной дыры он равен $3 r_g$). Кроме того, по движению горячей плазмы вблизи горизонта событий черной дыры определяют метрику пространства-времени и получают достаточные критерии для доказательства существования черных дыр.

2. **Регистрация всплесков гравитационно-волнового излучения** от слияния черных дыр в тесных двойных системах с помощью гравитационно-волновых антенн нового поколения (проекты “LIGA”, “VIRGO”, “LISA”). Будет изучаться динамическая картина пространства-времени и, возможно, удастся доказать, что сливаются именно черные дыры, а не другие объекты (например, нейтронные звезды).

3. **Обнаружение и следование движению диопульсаров в двойных системах с черной дырой**. Сейчас известно около 1500 радиопульсаров, из них около 100 входят в двойные системы (Земля и Вселенная, 1999, № 2; Спутниками известных диопульсаров могут быть нейтронные звезды, белые карлики, массивные горячие звезды, а также планеты. Пока не открыты диопульсары со спутниками – черными дырами. Теория предсказывает, что на каждую тысячу диопульсаров должен приходиться один пульсар в паре с черной дырой. В двойной системе он представляет собой, с одной стороны, “пробное тело” в поле тяготения второй компоненты, с другой – очень стабильные “часы” на орбите. Тщательные измерения движения радиопульсаров позволят понять метрику пространства-времени вблизи черной дыры и изучить эффекты, специфичные для вращающихся черных дыр. Если же повезет и плоскость, которой радиопульсар движется вокруг черной дыры, будет близка к лучу зрения, то можно заметить эффекты гравитационного линзирования (Земля и Вселенная, 1993, № 2; 2000, № 3) в движении пульсара при прохождении его радиои излучения в окрестности горизонта событий эргосферы черной дыры. Обсуждаются также возможности наблюдений эффектов гравитационного линзирования при движении звезд вблизи сверх-

массивной черной дыры в центре нашей Галактики.

4. **Наблюдения и интерпретация эффектов гравитационного микролинзирования ядер галактик – гравитационных линз.** Разрешение этого метода (10^{-6} угловых секунд) позволяет изучать структуру аккреционных дисков в ближайших окрестностях сверхмассивных черных дыр в ядрах галактик. Измерены массы трех одиночных черных дыр ($6-8 M_\odot$) при исследовании явления гравитационного микролинзирования звезд балджа нашей Галактики “темными объектами” галактического гало (эксперименты “MACHO” и “EROS”). Эффект микролинзирования заключается в изменении блеска более далекой звезды балджа Галактики при искривлении лучей света в гравитационном поле более близкого объекта (например, черной дыры). Длительность такого явления пропорциональна корню квадратному из массы гравитационной линзы, что и позволяет оценить ее массу. По виду кривой блеска можно отличить черную дыру от “кротовых нор”, или пространственно-временных тоннелей, предсказанных ОТО (Зем-

ля и Вселенная, 2004, № 1; 2005, № 3). “Кротовые норы” сформированы из экзотической материи с отрицательным давлением и анизотропными свойствами, не имеют горизонта событий и сингулярности в центре. Поиск “кротовых нор” – важная проблема астрофизики.

5. **Детальные исследования спектров, интенсивности, поляризации и переменности рентгеновского и гамма-излучения от аккрецирующих черных дыр с помощью космических обсерваторий нового поколения “GLAST” (2007) и “Спектр-РГ” (2011).** В частности, при таких наблюдениях может быть получена уникальная информация о вращении черной дыры и структуре пространства-времени вблизи горизонта событий.

6. **Постоянное накопление сведений** о массах черных дыр и нейтронных звезд, статистическое сравнение наблюдаемых проявлений аккрецирующих нейтронных звезд и черных дыр.

ПОДВЕДЕМ ИТОГИ

Мы описали современное состояние проблемы звездных черных дыр и сверхмассивных черных дыр в ядрах галактик. По-

скольку пока нет надежных наблюдательных данных, мы не затронули проблему *первичных черных дыр*, которые могли образоваться на ранних стадиях эволюции Вселенной. Не касались мы также проблемы черных дыр с промежуточными массами ($m = 10^2-10^4 M_\odot$), возможно, существующих в ядрах массивных шаровых звездных скоплений, а также в ядрах галактик сравнительно малой массы. Надежных наблюдательных данных о черных дырах промежуточных масс пока не получено. Не исключено, что некоторые из компактных рентгеновских источников очень высокой светимости (до 10^{34} Дж/с, или 10^{41} эрг/с), открытые недавно в областях около ядер ряда галактик, принадлежат к классу черных дыр промежуточных масс.

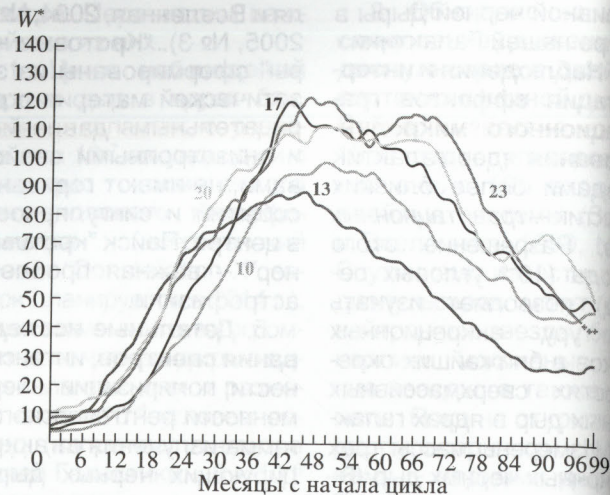
Благодаря космическим исследованиям открыты массивные и чрезвычайно компактные объекты, наблюдаемые свойства которых очень похожи на свойства черных дыр, предсказанные ОТО. Можно надеяться, что с помощью планируемых “критических” экспериментов в ближайшие десятилетия будет окончательно доказано существование черных дыр во Вселенной.

Солнце в феврале–марте 2005 г.

В конце зимы – начале весны 2005 г. солнечная активность продолжала падать и приблизилась к своему минимуму, что характерно для данного периода развития солнечного цикла. Пятнообразовательная деятельность держалась на низком и среднем уровнях. Ежедневное значение относительного числа пятен ни разу не поднялось до высокого уровня. Текущие среднемесячные значения относительного числа солнечных пятен $W_{\text{фев}} = 29.1$ и $W_{\text{март}} = 24.8$. Напомним, что максимум текущего солнечного цикла наступил в апреле 2000 г. ($W_{\text{max}}^* = 121.7$, $F_{10\text{см}}^* = 181$), вторичный максимум – в ноябре 2001 г. ($W^* = 115.6$, $F_{10\text{см}}^* = 193.6$).

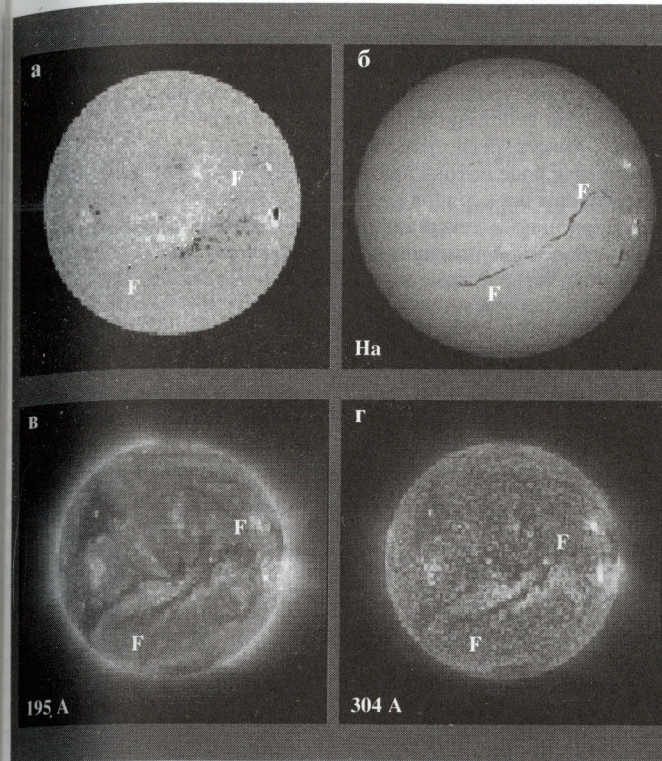
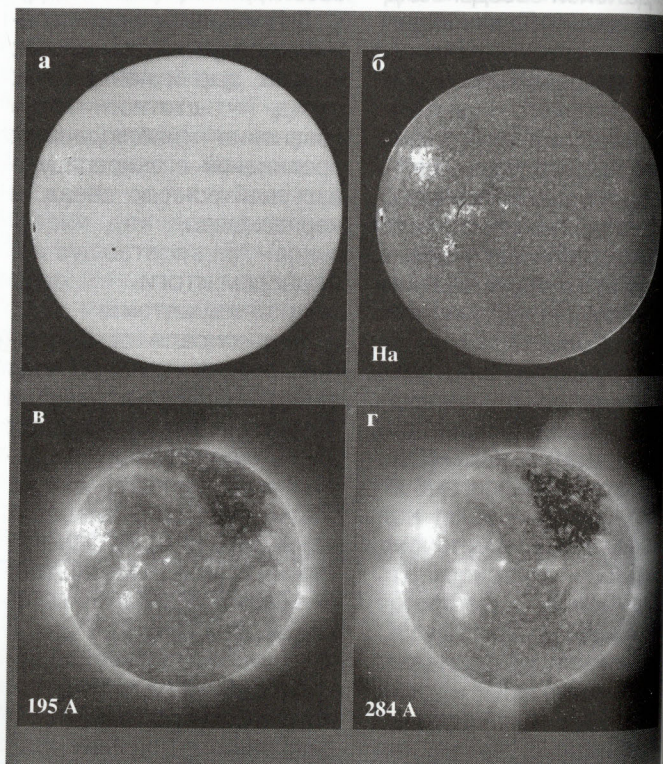
В феврале 2005 г. пятнообразовательная активность Солнца была средней с 7 по 20 февраля, а в остальные дни – низкой. Максимальное относительное число пятен ($W = 56$) отмечено 12 февраля, минимальное ($W = 7$) – 28 февраля. На видимом диске Солнца постоянно наблюдалось от 1 до 5 групп солнечных пятен, среди которых больших не было. Вспышечная активность весь месяц оставалась на низком и очень низком уровне за исключением 19 февраля, когда за западным лимбом Солнца произошла вспышка рентгеновского балла M3.3

Вид Солнца 08.02.2005 г.: а) в белом свете (непрерывном спектре); б) в самой сильной водородной линии видимой части солнечного спектра H_{α} ($\lambda = 6563 \text{ \AA}$); в, г) в линиях крайнего ультрафиолетового излучения $\lambda = 195 \text{ \AA}$, $284 \text{ \AA}$. Фото "SOHO".



(Земля и Вселенная, 2005, № 3). Кроме того, в феврале зафиксировано 4 выброса солнечных волокон. Геомагнитная обстановка была возмущенной 6 суток, в основном за счет прихода к Земле рекуррентных (повто-

ход развития (за 99 месяцев текущего 23-го цикла солнечной активности) среди аналогичных циклов (10, 13, 17 и 20). W^* сглаженные за 13 месяцев относительные числа солнечных пятен (числа Вольфа).



Гигантское солнечное волокно (протуберанец – F) 21.02.2005 г.: а) в магнитном поле видимого диска Солнца; б) в самой сильной водородной линии видимой части солнечного спектра H_{α} ($\lambda = 6563 \text{ \AA}$); в, г) вид волокна в линиях крайнего ультрафиолетового излучения $\lambda = 195 \text{ \AA}$, $304 \text{ \AA}$. Фото "SOHO".

ряющихся) высокоскоростных потоков солнечного ветра от солнечных корональных дыр. Продолжительная (63 ч) малая магнитная буря отмечена в период 7–10 февраля. На геостационарных орбитах 18 сут регистрировались интенсивные потоки высокоэнергичных электронов.

С 9 по 24 февраля по видимому диску Солнца проходило спокойное солнечное волокно длиной свыше 40 земных экваторов. Это облако намагниченной плазмы, располагающееся вблизи нейтральной линии продольного магнитного поля Солнца. Оно напоминает канат, висящий высоко над поверхностью Солнца. Когда такие солнечные волокна выходят на лимб (край) Солнца, мы видим хорошо известные астрономам протуберанцы.

В марте 2005 г. характер пятнообразовательной активности Солнца не изменился. С 7 по 25 марта она снова поднялась до среднего уровня, а в остальные дни была низкой. Максимальное относительное число пятен ($W = 43$) отмечалось 11 марта, а минимальное ($W = 7$) – 1 и 30 марта. На диске Солнца постоянно наблюдалось от 1 до 4 групп солнечных пятен. Вспышечная активность была низкой: не было вспышек среднего балла, зафиксирован лишь один выброс

Вид Солнца 09.03.2005 г.: а) в белом свете (непрерывном спектре); б) в самой сильной водородной линии видимой части солнечного спектра H_{α} ($\lambda = 6563 \text{ \AA}$); в, г) в линиях крайнего ультрафиолета $\lambda = 171 \text{ \AA}$, $304 \text{ \AA}$. Фото "SOHO".

солнечного волокна. Геомагнитное возмущение, достигшее уровня малой магнитной бури, отмечалось с 6 по 10 марта. Оно возникло в результате прохождения Земли через рекуррентный высокоскоростной поток солнечного ветра от большой приэкваториальной корональной дыры. Еще одно геомагнитное возмущение 25–27 марта,

вызванное рекуррентным высокоскоростным потоком от другой большой корональной дыры, не достигло уровня магнитной бури. На геостационарных орбитах 14 сут регистрировались интенсивные потоки высокоэнергичных электронов.

Информацию о текущем состоянии солнечной активности и ее прогноз на русском языке

можно найти на сайте: <http://www.izmiran.ru/space/solar/forecast>
Страница обновляется каждый понедельник.

В.Н. ИШКО
ИЗМИРАН

Источник снимков: Интернет, страницы Службы Солнца (www.sec.noaa.gov).

Информация

Наблюдения атмосферы и поверхности Титана

С 14 по 16 января Международная группа астрономов наблюдала Титан во время подлета и посадки на его поверхность спускаемого аппарата "Гюйгенс" (ESA) с помощью Очень Большого Телескопа (VLT) Паранальской обсерватории в Чили. Системы адаптивной оптики этого инструмента позволили ученым получить детальные изображения диска Титана, где видны его атмосфера и поверхность в нескольких спектральных полосах, расположенных в ближней инфракрасной области. Снимки невидимой с Сатурна стороны Титана сделаны в узкополосных фильтрах на длинах волн 1.28, 1.6 и 2.0 мкм. Эти длины волн соответствуют "метановым окнам", которые дают возможность наблюдать атмосферу Титана на всем ее протяжении по высоте. Руководитель группы Эрик Жандрон из Парижской обсерватории сказал: "Мы считаем, что данные фотографии – самые качественные за все время наблюдения Ти-

тана с помощью земной или космической техники". На снимках можно разглядеть сложную структуру дальней от Сатурна стороны Титана и место высадки зонда "Гюйгенс", различимы детали размером в 200 км.

Наилучшего качества и высокого контраста при фотографировании удалось достигнуть с помощью прибора SDI (Simultaneous Differential Imager – прибор для построения дифференциальных изображений) адаптивной оптической системы NACO¹. Его фильтры довольно точно выделяют полосу пропускания в метановом окне на длине волны 1.6 мкм.

На изображениях атмосферы Титана на длине волны 2.12 мкм видны яркий Южный полюс и яркая полоса в атмосфере. Возможно, это облака. Астрономы следят за этими метеорологическими явлениями с 2002 г. с помощью прибора NACO, установленного на 8.2-м телескопе VLT Европейской Южной Обсерватории. Полосы со временем тускнеют. На длине волны 2.7 мкм полоса не видна, и север-южная асимметрия, известная как "улыбка Титана", лучше видна на севере спутника. Два фильтра показывают различные уровни высоты в атмосфере, то есть изображения содержат ин-

формацию об эволюции север-южной асимметрии.

Астрономы провели также спектроскопические наблюдения Титана на различных длинах волн, из которых можно определить состав его поверхности. Прибор VIMS (Visible Multiobject Spectrograph – мультиканальный спектрограф в видимой области) на АМС "Кассини" исследовал поверхность Титана в инфракрасном диапазоне. Поскольку он находился достаточно близко к Титану, полученное им изображение имеет гораздо лучшее пространственное разрешение, чем снимок, сделанный с Земли. Однако с помощью прибора NACO на VLT астрономы могут наблюдать Титан со значительно большим спектральным разрешением (см. стр. 3 обложки). Таким образом, космические и наземные наблюдения дополняют друг друга.

Ученые надеются изучить природу поверхности Титана, объединив информацию, полученную зондом "Гюйгенс", подробную картографию, выполненную АМС "Кассини", и результаты будущих наблюдений VLT.

Пресс-релиз ESO № 04/05,
24 февраля 2005 г.

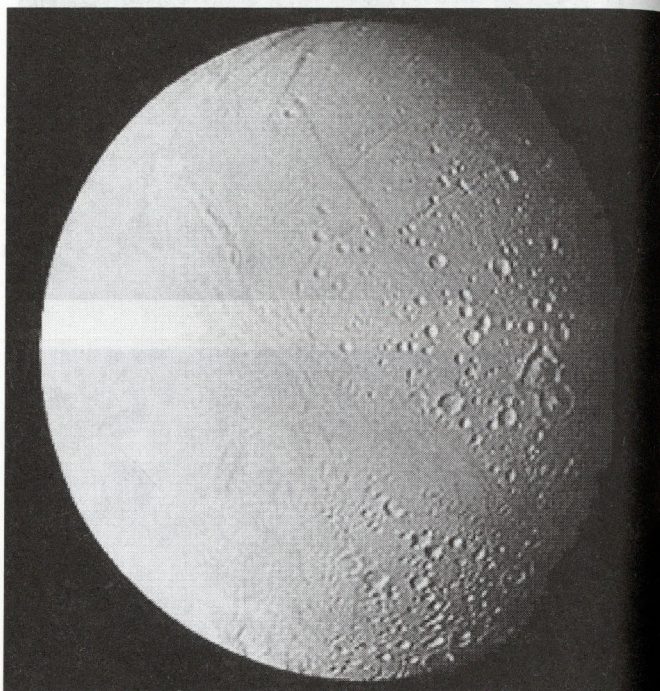
Подготовила Н.А. Липунова
ГАИШ

Информация

Атмосфера Энцелада

АМС "Кассини" в ходе двух пролетов (17 февраля и 9 марта 2005 г.) около спутника Сатурна Энцелад собрала информацию, которая позволила установить, что это небесное тело обладает собственной атмосферой. Энцелад стал вторым (после Титана) спутником в Солнечной системе, на котором обнаружена атмосфера. Она оказалась достаточно плотной.

Энцелад, диаметр которого примерно 500 км, обладает очень слабым гравитационным полем и не может удерживать газовую оболочку, поэтому для ее существования требуется постоянный источник. Сейчас ученые пытаются разгадать, что же является источником этой атмосферной оболочки: вулканы, гейзеры или



Спутник Сатурна Энцелад. Фото АМС "Кассини".

какая-то иная форма активности под поверхностью спутника. В результате наблюдений АМС "Кассини" выяснилось,

что у Энцелада есть магнитное поле.

NEWSru.com



Так выглядела атмосфера Титана последние три года. На снимках видны сезонные метеорологические изменения (север-южная асимметрия, которая также называется "улыбкой Титана"). По-видимому, они вызваны изменением химического состава на полюсах. Сейчас наиболее выделяется Северный полюс, а несколько лет назад ярче был Южный полюс. Снимки получены прибором NACO VLT на длине волны 2.12 мкм.

¹NACO = NAOS + CONICA. NAOS (Nasmyth Optical System – адаптивная оптическая система Нэсмита). CONICA (Coude Near Infrared Camera – инфракрасная камера, установленная в фокусе Кудэ).

Одиннадцатая экспедиция на МКС

15 апреля 2005 г. в 4 ч 46 мин по московскому времени с космодрома Байконур стартовала ракета-носитель "Союз-ФГ" с КК "Союз ТМА-6". На Международную космическую станцию отправились участники одиннадцатой основной экспедиции (МКС-11) и восьмой экспедиции посещения (ЭП-8). Экипаж корабля состоял из российского космонавта **С.К. Крикалёва** (командир МКС-11 и КК "Союз ТМА-6"), астронавта NASA **Дж. Филлипса** (бортинженер) и астронавта Европейского космического агентства **Р. Виттори** (Италия; бортинженер-2 КК "Союз ТМА-6"). Р. Виттори работал на станции по программе ЭП-8 и возвратился на Землю 25 апреля 2005 г. в 2 ч 08 мин по московскому времени на корабле "Союз ТМА-5" с экипажем МКС-10 (Земля и Вселенная, 2005, № 1). Американский астронавт, командир МКС-10 и бортинженер КК "Союз ТМА-5" **Л. Чжао** и российский космонавт, бортинженер МКС-10 и командир КК "Союз ТМА-5" **С.Ш. Шарипов** работали на станции в течение 193 сут.

Члены МКС-11 – С.К. Крикалёв и Дж. Филипс (см. стр. 2 обложки). **Сергей Константинович Крикалёв** (209-й астронавт мира, 67-й космонавт России) в **шестой раз** отправился на орбиту, общая длительность полетов – 624 сут, **семь раз** выходил в открытый космос. Он трижды работал на орбитальном комплексе "Мир": участник двух длительных экспедиций и двух полетов на КК "Спейс Шаттл" – STS-60 по программе "Мир-NASA" и первый полет на МКС по программе STS-88. **Джон Филлипс** (второй полет, 401-й астронавт мира, 252-й астронавт США) служил на авиа-

носах, совершил 250 палубных посадок, вышел в отставку в чине капитана 1-го ранга. Доктор наук по геофизике и космической физике, работал в Лос-Аламосской лаборатории, лауреат Оппенгеймеровской премии, автор более 500 публикаций по проблемам солнечного ветра и космической плазмы. Десятилетний Джон твердо решил стать астронавтом, когда в космос полетел Ю.А. Гагарин. Первый полет на МКС на КК "Индевор" (STS-100) он выполнил 19 апреля – 1 мая 2001 г.

Участник ЭП-8 полковник ВВС Италии **Роберто Виттори** (415-й астронавт мира, 4-й астронавт Италии) в мае 2002 г. уже летал на МКС в качестве бортинженера третьей экспедиции посещения по программе "Марко Поло" (Земля и Вселенная, 2002, № 5). Спонсором ЭП-8, как и во время его первого полета на МКС, выступает правительство итальянской провинции Лацио, где сосредоточены многие предприятия космической отрасли. Р. Виттори налетал около 2 тыс. часов на самолетах разного типа. В июле 1998 г. Р. Виттори был отобран Итальянским космическим агентством и ESA, через месяц его включили в состав отряда европейских астронавтов, который базируется в Европейском центре астронавтов в Кельне, Германия (Земля и Вселенная, 2000, № 6).

В дублирующий экипаж КК "Союз ТМА-6" включены М.В. Тюрин (РФ), Д. Тани (США) и Р. Тирск (ESA, Канада).

Задачи полета экипажа МКС-11: обслуживание операций по расстыковке кораблей "Союз ТМА-5", "Прогресс М-52", стыковка и расстыковка КК "Союз ТМА-6", разгрузка и совместная работа на станции с кораблями "Прогресс М-53 и -54", стыковка корабля "Союз ТМА-7", поддержание работоспособности станции, выход в открытый космос, выполнение программы научно-прикладных исследова-

ований, возвращение на корабль "Союз ТМА-6".

Программа научно-прикладных исследований на этапе проведения МКС-11, рассчитанная на 175 сут (до октября 2005 г.), включает около 40 экспериментов, в том числе по российской программе, а также контрактные работы. Например, по новой программе экипаж МКС выполнит интересный биологический эксперимент. Перед стартом экипажу вручили термометры с 200 пресноводными ресничными червями – лучшими объектами для исследования регенерации тканей, как считают в Институте медико-биологических проблем РАН, где разработан эксперимент. В ходе ЭП-8 длительностью 11 сут выполнено 22 эксперимента по программе "Энеида", разработанные учеными России и стран-участниц ESA. Это, в частности, изучение связи космической радиации с землетрясениями на планете, визуальные наблюдения Земли, медицинские, биотехнологические и технические эксперименты, фото- и видеосъемка.

Во время экспедиции МКС предполагается возобновление полетов многоцветных кораблей "Спейс Шаттл": "Дискавери" (STS-114) и "Атлантис" (STS-121). На КК "Атлантис" отправится в длительный полет астронавт ESA Т. Райтер (ФРГ). Он проверит монтаж и готовность оборудования служебного модуля "Звезда" для совместной работы с первым европейским грузовым кораблем (АТ) "Жюль Верн", (запуск которого намечен на апрель 2006 г.). Помимо приема и разгрузки КК "Спейс Шаттл", который доставит оборудование и научную аппаратуру, космонавты должны поставить немало опытов американской программе.

По материалам Роскосмоса, NASA, ESA, ЦУП и РКА "Энергия" им. С.П. Королёва (Подготовил С.А. Герасюков)

Планетные системы красных гигантов

Г. М. РУДНИЦКИЙ,

кандидат физико-математических наук
Государственный астрономический институт
им. П.К. Штернберга, МГУ

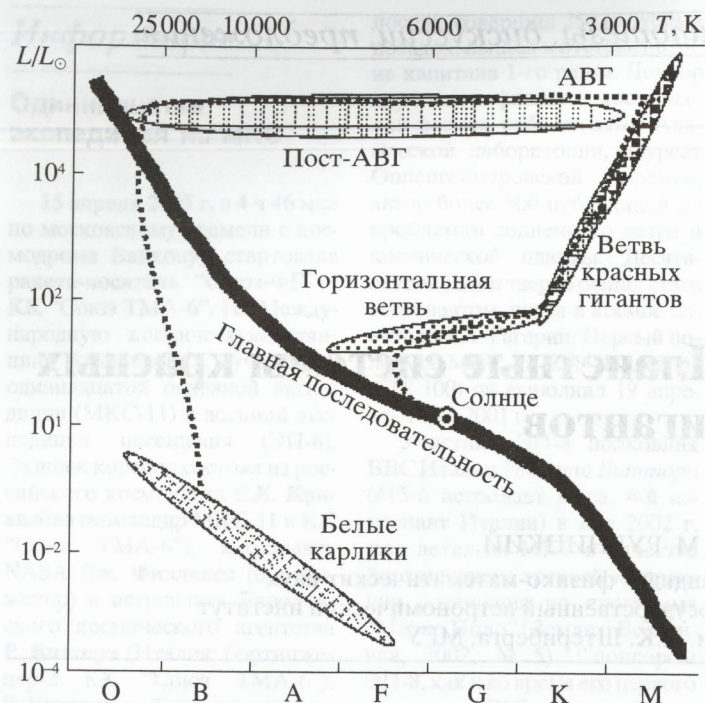
В последние годы более чем у сотни близких к Солнцу звезд главной последовательности обнаружены планетные системы. Когда эти звезды превратятся в красные гиганты, планеты с низкими орбитами и небольшими массами, оказавшиеся внутри звездной атмосферы, вероятнее всего, испарятся. Более далекие члены планетной системы, с массами порядка массы Юпитера или больше, могут пережить эту стадию, которая длится около 1 млн. лет. Близкий массивный спутник будет влиять на спектральные и фотометрические характеристики красного гиганта. Данный фактор может объяснить многие особенности этих звезд, в том числе аномально высокое содержание лития, быстрое вращение, а также долго-

периодические вариации блеска переменных звезд типа Миры Кита.

МЕСТО КРАСНЫХ ГИГАНТОВ В ЭВОЛЮЦИИ ЗВЕЗД

Солнце – рядовая звезда спектрального класса G2V главной последовательности диаграммы Герцшпрунга-Рессела (Г–Р). Оно находится примерно в середине длительного стабильного этапа своей жизни. Возраст Солнца – около 5 млрд. лет, и за все время его светимость менялась не более чем на 30% без каких-либо резких скачков. Это позволило нашей планетной системе существовать в почти неизменных условиях, возникнуть и развиваться жизни на Земле. Однако примерно через 5.7 млрд. лет спокойная жизнь Солнечной системы закончится. Согласно теории звездной эволю-

ции, все звезды, имеющие массу от одной до нескольких масс Солнца ($M_{\odot}$), на заключительном этапе вступают в фазу красного гиганта. Основная причина такого перехода – перестройка процессов ядерного горения в недрах звезды. На главной последовательности диаграммы Г–Р основной источник энергии в звездах – превращение водорода в гелий: $4^1\text{H} \rightarrow ^4\text{He}$. Когда в ядре звезды исчерпано водородное горючее, начинается сжатие ядра. Температура повышается примерно до 10^8 К, и становятся возможными ядерные реакции, приводящие к образованию из трех ядер гелия одного ядра углерода: $3^4\text{He} \rightarrow ^{12}\text{C}$. Реакция углерода с гелием приводит к образованию кислорода: $^{12}\text{C} \rightarrow ^4\text{He} \rightarrow ^{16}\text{O}$. Затем и гелий в ядре заканчивается. Звездное ядро к этому времени со-



стоит в основном из углерода с примесью изотопов кислорода и более тяжелых элементов. В двух слоях, окружающих ядро, ядерные реакции еще идут: в прилегающей к ядру оболочке продолжает гореть гелий, в более внешней — водород. Радиус звезды увеличивается многократно (до сотен $R_{\odot}$). У звезды развивается мощная кон-

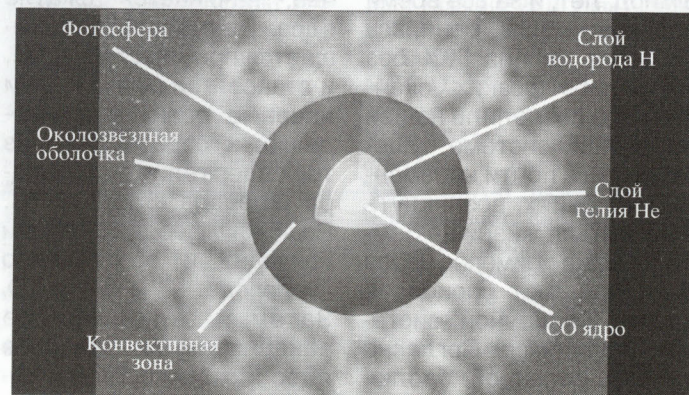
вективная зона размером до 99.9% радиуса звезды (R_*). Температура поверхности падает до 2000–3000 K, но светимость возрастает за счет увеличения размеров звезды и достигает нескольких тысяч $L_{\odot}$. В это время звезда быстро (звезды солнечной массы — за несколько миллионов лет) перемещается по диаграмме Г–Р с главной

последовательности сначала на горизонтальную ветвь, где ее светимость меняется мало, а температура падает. Далее звезда вступает на ветвь красных гигантов, а затем достигает **асимптотической ветви гигантов (АВГ)**, к которой звезды разных масс “асимптотически” приближаются в течение разного времени.

Когда звезда находится на АВГ, она начинает интенсивно терять вещество. Образуется протуженная газопылевая оболочка, которая, расширяясь, рассеивается в межзвездной среде. Скорость потери массы красных гигантов может достигать 10^{-7} – $10^{-5} M_{\odot}$ в год.

Звезда с массой порядка солнечной растрчивает на стадии АВГ значительную часть своего вещества за время от нескольких сотен тысяч до нескольких миллионов лет. Это очень малый период относительно времени жизни звезды на главной последовательности. По мере того как звезда освобождается от внешних холодных слоев, ее температура стремительно растет, и звезда быстро смещается влево по диаграмме Г–Р. Этому состоянию соответствует ветвь Post-AGB (Пост-АВГ — “после асимптотической ветви”). В результате конвективная оболочка полностью сбрасывается, и от звезды остается вырожденное ядро — белый карлик с температурой поверхности до 50 000 K, который не имеет ядерных источников энергии и впоследствии медленно остывает. Сброшенная околозвездная оболочка ионизируется под действием ультрафиолетового излучения горячего белого карлика и образует вокруг него планетарную туманность. Так заканчивают свой жизненный путь звезды солнечного типа. Впервые подобная идея была высказана И.С. Шкловским¹, который обратил внимание, что ядро красного гиганта — это готовый белый карлик, которому остается лишь освободиться от окружающей оболочки. В настоящее время эта схема эволюции является общепринятой.

Строение красного гиганта. В центре находится ядро, размер которого занимает всего 1% процента радиуса звезды. Вокруг ядра расположены слои, в которых продолжает горение гелия (ближе к ядру) и водорода. Далее располагается обширная конвективная зона. Звезда теряет вещество, которое образует расширяющуюся газопылевую околозвездную оболочку. Рисунок А.Г. Рудного.



достигать 10^{-7} – $10^{-5} M_{\odot}$ в год. Звезда с массой порядка солнечной растрчивает на стадии АВГ значительную часть своего вещества за время от нескольких сотен тысяч до нескольких миллионов лет. Это очень малый период относительно времени жизни звезды на главной последовательности. По мере того как звезда освобождается от внешних холодных слоев, ее температура стремительно растет, и звезда быстро смещается влево по диаграмме Г–Р. Этому состоянию соответствует ветвь Post-AGB (Пост-АВГ — “после асимптотической ветви”). В результате конвективная оболочка полностью сбрасывается, и от звезды остается вырожденное ядро — белый карлик с температурой поверхности до 50 000 K, который не имеет ядерных источников энергии и впоследствии медленно остывает. Сброшенная околозвездная оболочка ионизируется под действием ультрафиолетового излучения горячего белого карлика и образует вокруг него планетарную туманность. Так заканчивают свой жизненный путь звезды солнечного типа. Впервые подобная идея была высказана И.С. Шкловским¹, который обратил внимание, что ядро красного гиганта — это готовый белый карлик, которому остается лишь освободиться от окружающей оболочки. В настоящее время эта схема эволюции является общепринятой.

ПОИСК ВНЕСОЛНЕЧНЫХ ПЛАНЕТНЫХ СИСТЕМ

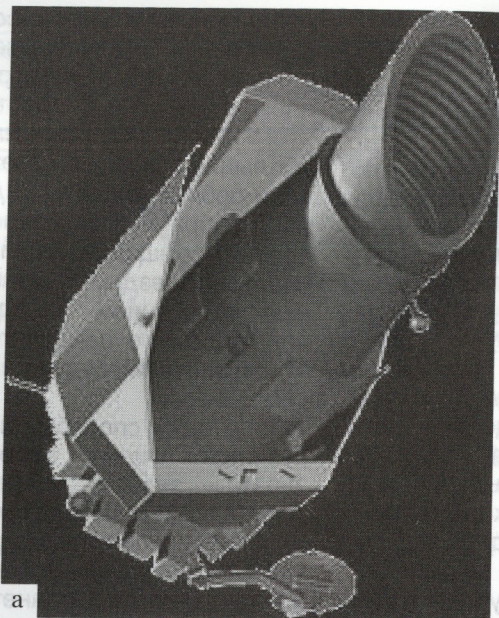
Как обнаружить планету около другой звезды? Самый прямой способ — поиск в окрестностях звезды с помощью крупного телескопа. Если планета близка к звезде, то ее слабый отраженный свет будет “тонуть” в лучах своего солнца. Если же планета далеко, то отделить ее от звезды проще, но отраженный свет окажется слабее. Прямые наблюдения планет около ближайших звезд — дело будущего, возможно недалекого. Пока используются только косвенные методы поиска внесолнечных планет. Самый старый из них, **астрометрический**, — поиск невидимых спутников по отклонениям в собственных движениях звезд на небесной сфере, к сожалению, не дал достоверных результатов.

Другой метод обнаружения планет вокруг звезд — использование **эффекта Доплера**. В настоящее время этим методом обнаружены почти все известные внесолнечные планетные системы. Если звезда имеет планету, то оба небесных тела обращаются вокруг общего центра тяжести. Звезда движется по малой орбите, планета — по большой. Средняя скорость движения планет по орбитам — десятки километров в секунду, а скорость движения звезды вокруг центра тяжести под действием планеты — несколько метров или десятков мет-

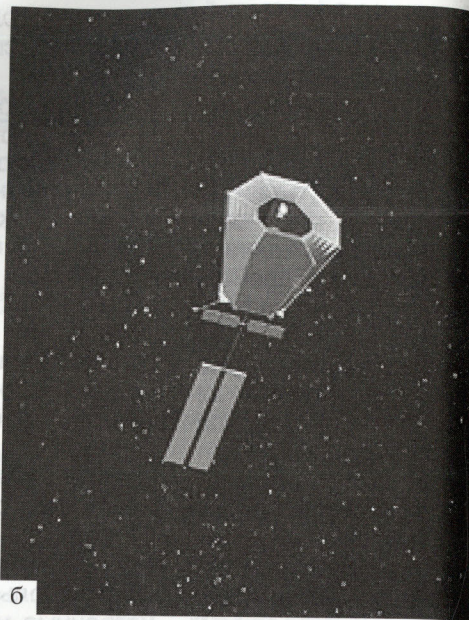
ров в секунду. Задача состоит в том, чтобы по смещениям линий в спектре звезды измерить скорость этого движения. Здесь наибольшие шансы на успех, если орбита планеты видна “с ребра”. Тогда доплеровские смещения линий в спектре звезды, вызванные движением звезды вокруг общего центра тяжести системы, будут максимальными.

Еще один способ обнаружения планет вокруг звезд — затменный, или транзитный. Наблюдатели ищут небольшие периодические ослабления блеска звезды, когда планета проходит по диску звезды (“затмевает” ее). В этом случае (как и в доплеровском методе) необходимо, чтобы орбита планеты наблюдалась “с ребра”, тогда есть шанс увидеть затмение. Если угол наклона плоскости орбиты к картинной плоскости i не очень сильно отличается от 90° , есть вероятность, что планета пройдет по диску звезды. Затмение может происходить только в узком диапазоне углов i вблизи 90° ; если оно наблюдается, то, примерно зная угловой размер диска звезды, можно наложить жесткие ограничения на величину наклона орбиты и тем самым точнее оценить массу планеты. Планета гораздо меньше звезды и способна закрыть только малую часть звездного диска. Поэтому блеск звезды во время затмения ослабнет немного, на тысячные доли звездной вели-

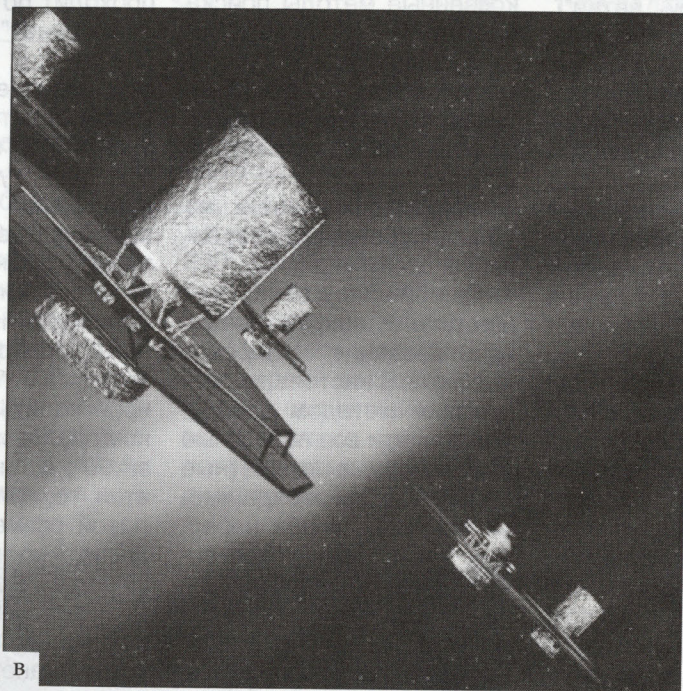
¹ Астрономический журнал, 1956, т. 33, № 3, с. 315–329.



а



б



в

Космические аппараты, миссией которых в недалеком будущем станет поиск и наблюдение экзопланет: а) КА "Кеплер", запуск намечен на 2006 г.; б) КА "TPF" (Terrestrial Planet Finder – поиск планет земного типа) будет запущен после 2010 г.; в) космический интерферометр "Darwin", состоящий из 10 телескопов. Фото NASA.

чины. Транзитный метод применяется для обнаружения планетных систем в рамках польско-амери-

канского эксперимента OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment – поиск гравитационных линз).

Наконец, с целью прямых наблюдений экзопланет планируется несколько космических миссий

Один из ближайших запусков – проект "Кеплер" – NASA намечает на 2006 г. Другой проект – TPF (Terrestrial Planet Finder – поиск планет земного типа). Запуск КА по этому проекту может быть осуществлен после 2010 г. Интерферометр инфракрасного диапазона TPF составят четыре зеркала диаметром по 3,5 м. Третий проект – космический интерферометр Darwin – разрабатывается Европейским космическим агентством (ESA). Инструмент будет состоять из 10 отдельных телескопов, обращающихся на околоземной орбите недалеко друг от друга. Между ними планируется установить лазерную связь. Чувствительность и угловое разрешение систем телескопов TPF и Darwin во много раз превысят аналогичные параметры крупнейших наземных инструментов. Тогда, возможно, удастся непосредственно увидеть внесолнечные планеты.

В последнее десятилетие XX в. произошел настоящий прорыв в исследовании внесолнечных планетных систем. Доплеровские наблюдения многих звезд, начатые в 1991 г. на нескольких обсерваториях, принесли сенсационные результаты. Оказалось, что многие из близких к Солнцу звезд обладают планетными системами. Первая внесолнечная планета была открыта доплеровским методом в 1995 г. М. Майором и Д. Келозом (Женевская обсерватория) у звезды класса G2.5IV 51 Пегаса (Земля и Вселенная,

1998, № 3). На 1 апреля 2005 г. известно 152 планеты в системах вокруг 134 звезд, у 14 обнаружено по 2–4 планеты.

Большинство экзопланет по своим свойствам напоминают планеты-гиганты Солнечной системы. Чем массивнее планета, тем большее влияние она оказывает на свою звезду и тем значительнее изменения лучевой скорости звезды. Легче всего обнаружить планеты с массой порядка массы Юпитера ($M_{\text{Ю}}$) и крупнее. Чем короче период обращения планеты ($T_{\text{пл}}$), тем проще ее найти. При наблюдениях спектра звезды в течение месяца или двух уже можно увидеть периодические изменения ее лучевой скорости, вызванные планетой. Периоды обращения некоторых планет с массами 1–2 $M_{\text{Ю}}$ чуть более суток, а их расстояние от звезды примерно в 40 раз меньше, чем расстояние от Земли до Солнца. Естественно, столь близкие к звездам планеты будут сильно нагреваться. Поэтому их называют "горячие юпитеры".

Эксцентриситеты (e) орбит внесолнечных планет сильно различаются. В Солнечной системе у большинства планет эксцентриситеты орбит небольшие (наибольший у Плутона, $e = 0.24$). В других планетных системах есть орбиты планет с эксцентриситетом до 0.7.

Блестящее подтверждение результатов, полученных доплеровским методом, – наблюдение затмения звезды HD 209458

в созвездии Пегаса (расстояние от Солнца 153 световых года). Около нее ранее обнаружили планету массой 1.43 $M_{\text{Ю}}$ по изменениям лучевой скорости. По параметрам орбиты планеты были предсказаны ожидаемые моменты затмений звезды, продолжительность которых составляет несколько часов. Период обращения планеты у HD 209458 всего 3.5 сут, поэтому ее затмения можно наблюдать очень часто. Первые успешные результаты дал и транзитный метод в рамках программы OGLE: у четырех звезд солнечного типа найдены короткопериодические планеты.

Большинство звезд, у которых к настоящему времени открыты планеты, принадлежат к спектральному классу G главной последовательности, среди них есть также несколько красных карликов класса M. Поиск планет у красных гигантов – более трудная задача. Здесь не подходит ни один из перечисленных выше методов. Все известные яркие красные гиганты – звезды высокой светимости – находятся на расстояниях в сотни парсек от Земли. Их собственные движения очень малы. Для того чтобы найти в них малые отклонения, вызванные планетой, нужны сотни и тысячи лет высокоточных астрометрических наблюдений. Доплеровский метод годится лишь для относительно ранних красных гигантов, принадлежащих к спектральному классу K. Только у этих звезд мож-

КРАСНЫЕ ГИГАНТЫ И СУБГИГАНТЫ, У КОТОРЫХ ОБНАРУЖЕНЫ ПЛАНЕТЫ

Название	ϵ Дракона	ϵ Сетки	γ Цефея
HD	137759	47536	222404
Спектральный класс	K2III	K1III	K2IV
Видимая звездная величина m_v	3.31	5.25	4.44
Расстояние, пк	31	121	18
Масса звезды, $M_\odot$	1.05	1.1–3.0	1.2
Радиус звезды, $R_\odot$	13	23	4
Масса планеты $\times \sin i$, M_J	9–25	5–10	1.28
Период обращения планеты, сут	536	712	424
Большая полуось орбиты a , а.е.	1.3	2.25	1.18
Эксцентриситет e	0.7	0.2	0.058

Примечание. Параметры приведены по данным Каталога внесолнечных планет Медонской обсерватории во Франции (<http://www.obspm.fr/planets>). Со времени сдачи статьи в печать найдены планеты еще у нескольких красных гигантов и субгигантов: HD 16141, ψ^1 Водолея, HD 104985, HD 59686, HD 142, HD 13189.

но найти в спектре достаточно узкие и резкие атомарные линии поглощения, которые дадут возможность измерять лучевую скорость звезды с необходимой точностью. Для более поздних звезд классов M, S, C с переходом на ветвь АВГ доплеровский метод становится неприемлемым. Безнадежно также искать затмения: планета закрывает малую часть огромного диска красного гиганта, и блеск звезды во время затмения ослабевает на ничтожную величину (собственные вариации блеска красных гигантов гораздо больше). Прямые наблюдения планет у красных гигантов опять-таки вряд ли возможны из-за их большой удаленности. Тем не менее по косвенным признакам все же можно определить, обладает ли планетой красный гигант на стадии АВГ.

СУДЬБА ПЛАНЕТНОЙ СИСТЕМЫ

После нескольких миллиардов лет, проведенных на главной последовательности, звезда с массой порядка солнечной перейдет в стадию красного гиганта. Радиус звезды возрастает сначала в несколько десятков, затем в несколько сотен раз и может достигнуть 1 а.е. Если у звезды была планетная система, то планеты с небольшими полуосями орбит $a < 1$ а.е. окажутся погруженными в атмосферу звезды. Их дальнейшую судьбу впервые рассмотрел С. Вила (США) в 1984–

1985 гг. Затем вопрос о разрушении планет вблизи красного гиганта подробно обсуждали астрономы М. Ливини и Н. Сокер (Израиль), К. Страк-Марселл (США), К.Р. Рыбицкий (Польша) и К. Дени (Бельгия). Общий вывод из этих работ следующий: планеты внутри зоны порядка одной астрономической единицы (в Солнечной системе это Меркурий и Венера) будут поглощены расширившейся атмосферой звезды, затормозятся в ней и, двигаясь по спиральной траектории к центру звезды, испарятся. Более удаленные планеты (у нас это Марс, Юпитер, Сатурн и т.д.), скорее всего, выживут. Не ясна судьба планет, находящихся примерно на таком расстоянии от своей звезды, как Земля от Солнца ($a = 1$ а.е.). Если радиус звезды достигнет величины несколько меньшей, чем 1 а.е., то у планеты есть шанс пережить стадию АВГ своего светила. Если же радиус красного гиганта (например, Солнца на этой стадии эволюции) окажется несколько больше, то планета (в нашем случае Земля) погибнет. Наблюдатель, находящийся в другой солнечной системе, может заметить гибель далекой от него планеты. Пример тому – возможное поглощение планетной системы звездой V838 Единорога. В 2002 г. эта звезда испытала подряд три вспышки с интервалом в несколько месяцев. До вспышки она, вероятнее всего, относилась к звездам главной по-

следовательности класса F. После вспышки она эволюционирует к более низким температурам и излучает в основном в инфракрасном спектре. Исследователи сочли звезду массивной переменной, у которой произошла термоядерная вспышка в оболочке. Была предложена и другая интерпретация: при быстром переходе к стадии красного гиганта V838 Единорога планета, глотила одну за другой планеты, обращавшиеся на близких орбитах; удалась такая операция, заставив редчайший момент гибели целой планетной системы.

Насколько часто могут наблюдаться подобные катастрофы? Поиски планетных систем доплеровским методом привел к открытию планет у нескольких красных гигантов классов K. Среди проэволюционировавших звезд это еще “молодняк”. Их радиусы 5–23 $R_\odot$; они пока “глотают” свои планеты, им только предстоит разрастись до размеров типичных звезд стадии АВГ. Планета с массой, близкой к 11 M_J (пока не подтвержденная), возможно, обнаружена также у гиганта K5III Альдебаран (α Тельца), одной из наиболее ярких звезд зимнего неба. Радиус Альдебарана – половина расстояния от Солнца до Меркурия.

ПЛАНЕТА В АТМОСФЕРЕ КРАСНОГО ГИГАНТА

Что будет с планетой, когда центральная звезда расширится почти до орбиты? Представим, что планета обращается в

окружении звезды с массой, близкой к массе Солнца, на расстоянии в 1 а.е. со скоростью $V_{пл} \sim 30$ км/с. Если звезда достигла стадии АВГ, то планета оказывается погруженной в среду с температурой около 2000 К и концентрацией газа $10^{12}–10^{13}$ см⁻³. При таких условиях скорость планеты намного больше скорости звука (3.4 км/с). Движение планеты сходно с движением крупного метеороида в атмосфере Земли. Образуется мощная коническая ударная волна, ионизирующая газ и нагревающая его до 10 000–15 000 К.

Верхняя атмосфера звезды АВГ – достаточно разреженный газ, если подходить к ней с мерками для атмосфер звезд главной последовательности: у нижней границы хромосферы Солнца концентрация газа достигает 10^{16} см⁻³. По земным понятиям, атмосфера красного

гиганта – глубокий вакуум. В столь разреженной среде планета слабо тормозится. Оценки показывают, что в течение стадии АВГ (которая длится около миллиона лет) большая полуось планетной орбиты уменьшится из-за торможения не более чем на 20%. Масса планеты невелика по сравнению с массой звезды. И все-таки движущаяся планета типа Юпитера, возможно, оказывает сильное влияние на звезду и ее оболочку, сбросившую после перехода к белому карлику. Планета может ускорить вращение своей звезды. Когда звезда главной последовательности становится красным гигантом и расширяется в сотни раз, ее вращение вокруг оси вследствие сохранения момента многократно замедляется. Однако известны достаточно быстро вращающиеся красные гиганты. Возможный

механизм такого ускорения – передача момента оболочке звезды от планеты, которая тормозится в атмосфере. Помимо непосредственного газодинамического воздействия (“сгребания” газа), планета оказывает приливное действие на звезду, что также способствует раскрутке. Пока звезда находится на АВГ, планета успевает значительно ускорить ее вращение. Известно, что угловой момент орбитального движения Юпитера в 100 раз превышает вращательный момент Солнца. Согласно расчетам Н. Сокера, когда Солнце достигнет стадии АВГ и Юпитер начнет передавать свой момент около-солнечной оболочке, скорость ее вращения у орбиты Юпитера может достичь одной десятой скорости его движения по орбите.

Планета способна обогатить красный гигант редки-

ми для звезд такого типа изотопами, например литием-6. Этот изотоп образовался на ранних стадиях эволюции Вселенной. Литий-6 быстро выгорает в ядерных реакциях, и в проэволюционировавших звездах он должен был давно исчезнуть. В последнее время все большую популярность завоевывает гипотеза, согласно которой литий мог попасть в атмосферу красного гиганта при поглощении им планеты. В планете Li^6 хранился в "законсервированном" виде, пока она не испарилась.

По мнению автора, планета, обращающаяся на подходящей орбите, может превратить красный гигант в долгопериодическую переменную звезду.

Ближние спутники оказывают серьезное влияние на процесс потери массы звездой. Движение планеты в верхней атмосфере и внутренней околозвездной оболочке красного гиганта приводит к концентрации газа и аккреции вещества на планету. В атмосфере звезды образуется утолщение, кольцом охватывающее звезду в плоскости орбиты планеты. Кольцо препятствует истечению вещества, поэтому расширение околозвездной оболочки идет перпендикулярно орбитальной плоскости в виде двух широких струй. Это, а также ускорившееся вращение звезды, нарушают сферическую симметрию околозвездной оболочки. Позднее, когда звезда станет белым карликом и ионизует оболочку, эта асимметрия проявится и в форме воз-

никшей планетарной туманности. Возможно, влиянием близких спутников объясняется причудливая форма многих планетарных туманностей: биполярных, в виде отдельных струй и даже многоугольных (Земля и Вселенная, 1998, № 4).

Наконец, планеты могут проявить себя даже после образования планетарной туманности вокруг бывшего красного гиганта. К тому времени центральная звезда уже станет белым карликом. Н. Сокер предложил искать в планетарных туманностях ионизованные следы планет. Излучение этих ионизованных "хвостов" может быть достаточно интенсивным для обнаружения современными наблюдательными средствами.

МИРИДЫ – КРАСНЫЕ ГИГАНТЫ С ПЛАНЕТАМИ?

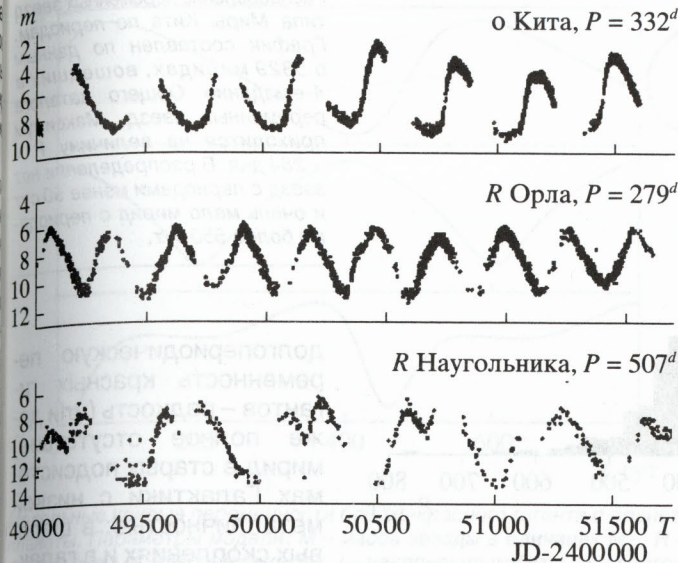
Красные гиганты класса К непостоянны или слабо переменны. Из звезд К III к подтвержденным переменным принадлежит не более 1%. Начиная со спектрального класса M1, доля переменных звезд возрастает. Многие красные гиганты на АВГ проявляют себя как переменные – долгопериодические (типа Миры Кита, или мириды) и полуправильные (Земля и Вселенная, 1988, № 2). Периоды (циклы) изменений блеска составляют от 100 до 600–700 и более суток. Амплитуды переменности у мирид достигают в видимой области спектра 10–11^m, в ИК-диапазоне вариаций блеска значи-

тельно меньше. У полуправильных красных гигантов визуальные амплитуды меньше 2.5^m, а характер изменений блеска менее регулярен, чем у мирид.

Механизм переменности звезд АВГ до конца не выяснен. Основная идея существующих работ: причина переменности красных гигантов – мирид – изменение прозрачности и (или) температуры их атмосферных слоев, ответственные за основное излучение континуума. В предыдущих моделях явно или неявно подразумевалось, что эти изменения вызваны периодическим прохождением ударных волн. В свою очередь, ударные волны создаются пульсациями звезды. Еще в 1950-е гг. делались попытки построить теорию переменности мирид, аналогичную теории для цефеид (Земля и Вселенная, 1966, № 1; 1967, № 2). Удовлетворительной модели пульсаций мирид нет до сих пор.

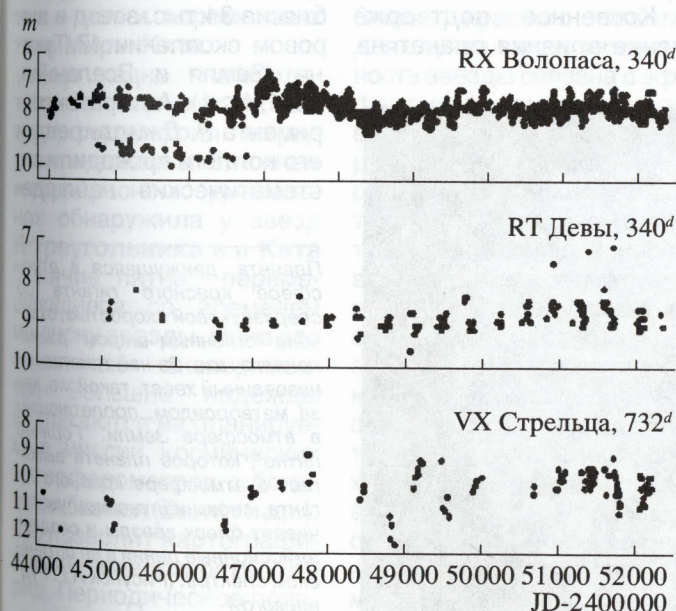
В ряде работ предлагаются нетрадиционные объяснения механизма переменности звезд типа Миры Кита. Один из них – неоднородное распределение поверхностной яркости красного гиганта вследствие вращение, наличие крупных темных конвективных ячеек и т.д.

В последние годы автором данной статьи и, независимо, французским астрономом Полем Берлиоз-Арто предложен альтернативный механизм переменности мирид. Причиной вариаций блеска может быть локальный разогрев атмосферы мириды близ



ким спутником (планетой или коричневым карликом). При этом период обращения спутника по орбите с большой полуосью 1 а.е. вокруг звезды с массой, близкой к массе Солнца, равен одному году. Если спутник обращается вокруг звезды на бо-

лее низкой орбите, он тонет в атмосфере звезды. Если спутник далеко, среда, в которой он движется, недостаточно плотная, и он не оказывает большого воздействия на блеск и спектр звезды. Таким образом, большие полуоси орбит чуть менее

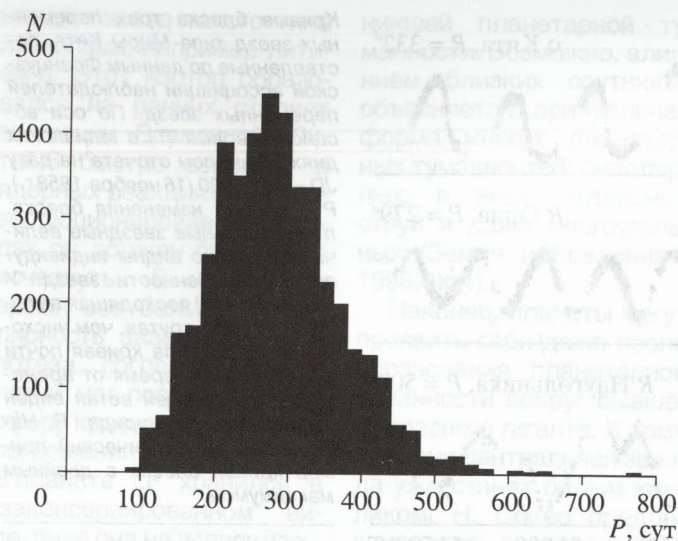


Кривые блеска трех переменных звезд типа Миры Кита, составленные по данным Французской ассоциации наблюдателей переменных звезд. По оси абсцисс – время (T) в юлианских днях с началом отсчета на дату JD = 2 400 000 (16 ноября 1858 г.), P – период изменения блеска, m – визуальные звездные величины. Хорошо видны индивидуальные особенности звезд. У o Кита (Миры) восходящая ветвь кривой более крутая, чем нисходящая. У R Орла кривая почти симметричная, время от времени на восходящей ветви виден "горб". Южная мирида R Наугольника – классический пример кривой блеска с двойным максимумом.

1 а.е. – самые благоприятные для проявлений взаимодействия спутника с атмосферой красного гиганта. Отсюда и максимум в распределении периодов мирид вблизи значения P = 284 дня.

"Огненный шар", возникающий вокруг спутника, своим излучением создает "горячее пятно" в атмосфере гиганта. За спутником тянется ионизованный "хвост", такой же как при движении крупного метеороида в земной атмосфере. В "горячем пятне" сосредоточена область генерации оптических эмиссионных линий, регулярно появляющихся в спектрах мирид. При орбитальном движении спутника пятно перемещается

Кривые блеска полуправильных переменных звезд. Указано характерное время изменения блеска. Амплитуда кривых меньше, чем у мирид, а сами кривые гораздо менее регулярны. Иногда изменения блеска почти прекращаются.



Распределение переменных звезд типа Миры Кита по периодам. График составлен по данным о 5829 миридах, вошедших в 4-е издание Общего каталога переменных звезд. Максимум приходится на величину $P = 284$ дня. В распределении не звезд с периодами менее 90 сут и очень мало мирид с периодами более 550 сут.

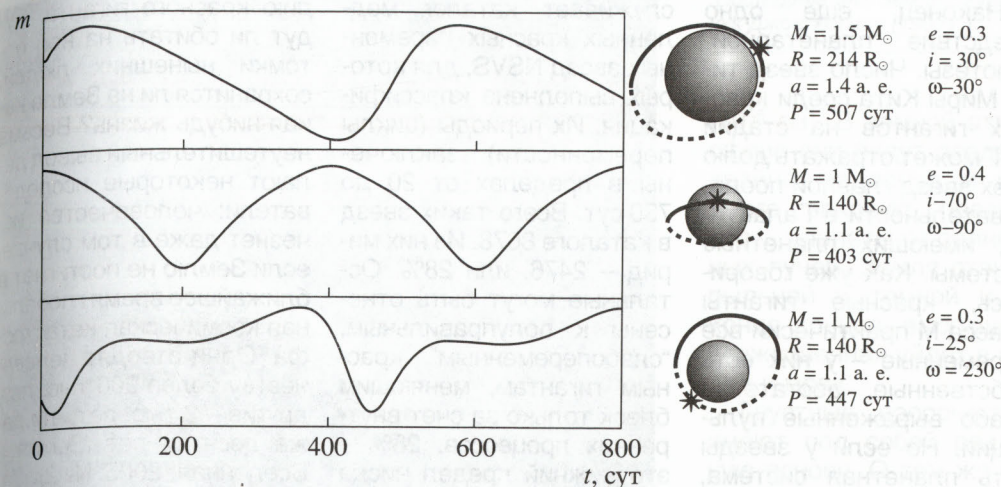
по поверхности красного гиганта. Если угол наклона плоскости орбиты к картинной плоскости не очень мал, переменность блеска звезды и интенсивность эмиссионных линий можно объяснить периодически появляющимися "горячего пятна" из-за лимба и заходами за него. В рамках данной гипотезы непостоянные или "слабопеременные" красные гиганты — полуправильные звезды с

малыми амплитудами переменности — могут менять блеск за счет собственных слабых хаотических колебаний. У мирид переменности большой амплитуды создается в первую очередь воздействием спутника, а все нерегулярности кривой блеска можно отнести на счет хаотических собственных вариаций красного гиганта.

Косвенное подтверждение влияния планет на

долгопериодическую переменность красных гигантов — редкость (или даже полное отсутствие) мирид в старых подсчетах Галактики с низкой металличностью: в шаровых скоплениях и в галактическом гало. Среда с низким содержанием металлов не способствует образованию планет, для их формирования нужны тяжелые элементы. Это также подтверждает видное отсутствие звезд-планет в шаровых скоплениях. На КТХ специально поставлен эксперимент по исследованию кратковременных падений блеска 34 тыс. звезд в шаровом скоплении 47 Тукана (Земля и Вселенная 2001, № 1). Авторы эксперимента Р. Джиллиленд и его коллеги проводили систематические наблюде-

Планета, движущаяся в атмосфере красного гиганта со сверхзвуковой скоростью, охвачена "огненным шаром" раскаленного газа. За ней тянется ионизированный хвост, такой же, как за метеороидом, пролетающим в атмосфере Земли. "Горячее пятно", которое планета вызывает в атмосфере красного гиганта, своим излучением увеличивает блеск звезды и создает эмиссионные линии в ее оптическом спектре. (Рисунок А.Г. Рунникова.)



Модельные кривые переменности блеска красного гиганта с планетой. Справа — расположение орбиты планеты. Параметры модели: M — масса звезды в единицах $M_{\odot}$, R — радиус ($R_{\odot}$), a — большая полуось орбиты (а.е.), e — эксцентриситет, i — наклонение орбиты, ω — долгота периастра. Орбита изображена в проекции на картинную плоскость, проходящую через центр звезды. Периастр отмечен звездочкой; часть орбиты, находящаяся позади картинной плоскости, показана пунктиром.

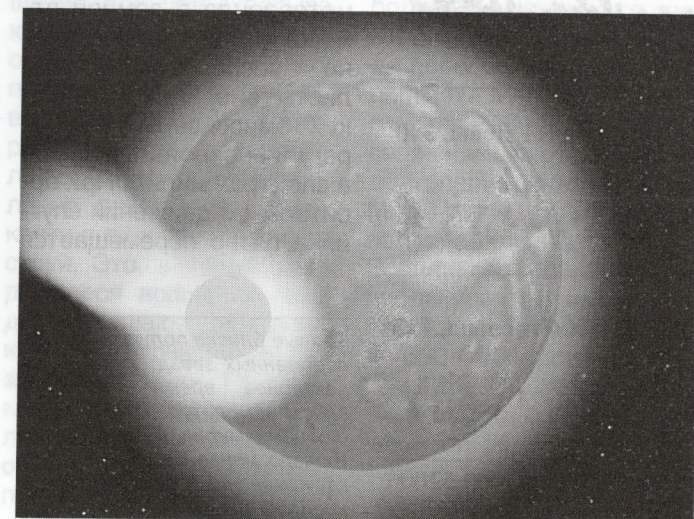
ния за скоплением в течение 8 сут в июле 1999 г. Ни у одной звезды этого скопления не найдено затмений, хотя они (по статистике наклонов орбит) должны были наблюдаться не менее чем у 15–20 звезд. **Итак, нет планетных систем — нет и переменных типа Миры Кита.**

Еще одно наблюдательное свидетельство: интерферометрия мирид в оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах обнаружила у звезд **Р Треугольника** и **о Кита** "горячие пятна", перемещающиеся со временем по диску звезды. Пока это единичные эксперименты. Большие надежды возлагаются на планируемые миссии космических интерферометров с большими базами (Darwin и др.), что позволит картографировать поверхность мирид. Периодическое появ-

ление "горячих пятен" в соответствии с изменениями видимого блеска мирид послужило бы прямым подтверждением предлагаемой гипотезы.

Автор статьи рассчитал модельные кривые блеска, показывающие изменение блеска красного гиганта для случая, когда переменность звезды связана с эффектом "огненного шара" вокруг ее спутника. Выбирались параметры центральной звезды, характерные для красных гигантов — проэволюционировавших звезд солнечного типа. Подбором элементов орбиты спутника можно воспроизвести практически любую наблюдаемую форму кривых блеска, в том числе с горбами на восходящих и нисходящих ветвях и даже с двойным максимумом. Модельные кривые также объясняют изменения периодов звезд.

У некоторых мирид период довольно быстро сокращается. Так, у **Р Гидры**, известной как переменная с 1704 г., период к настоящему времени сократился с 500 до 386 сут, у **Р Орла** после 1856 г. — с 348 до 279 сут. Уменьшение периода естественно связать с торможением планеты в атмосфере красного гиганта. У некоторых мирид (их немного) период увеличивается. Например, у **W Дракона** период возрос с 257 сут в 1904 г. до 279 сут в 1969 г. Возможно, эти мириды на данном этапе быстро теряют массу, что приводит к увеличению размеров орбиты планеты. Интересно также, что модель воспроизводит и зависимость "период—светимость" для мирид; до сих пор считалось, что она обусловлена пульсационными свойствами звезд.



Наконец, еще одно следствие "планетарной" гипотезы. Число звезд типа Миры Кита среди красных гигантов на стадии АВГ может отражать долю всех звезд главной последовательности в Галактике, имеющих планетные системы. Как уже говорилось, красные гиганты класса М практически все переменные – у них есть собственные, достаточно слабо выраженные пульсации. Но если у звезды есть планетная система, то при некотором расширении радиуса звезды планета на подходящей орбите начинает оказывать "ударное воздействие" на звездную атмосферу. Изменения блеска становятся более регулярными, их амплитуда возрастает, звезда превращается в мириду. Таким образом, отношение числа мирид к полному числу М-гигантов – это и есть доля звезд, у которых на главной последовательности были планеты с "подходящими" параметрами (большая полуось порядка 1–2 а.е.).

Оценить долю мирид среди звезд АВГ можно по результатам нового обзора *NSVS (Northern Sky Variability Survey – обзор переменности северного неба)*. Он выполнялся с 1997 г. по 2001 г. с помощью автоматизированного телескопа "робота" ROTSE-1, установленного в Национальной лаборатории Лос-Аламос (США). Огромная база данных наблюдений содержит ценнейший материал для исследования переменных звезд разных типов. Особого внимания за-

служивает каталог медленных красных переменных звезд NSVS, для которых выполнена классификация. Их периоды (циклы переменности) заключены в пределах от 20 до 730 сут. Всего таких звезд в каталоге 8678. Из них мирид – 2476, или 28%. Остальные могут быть отнесены к полуправильным, "слабопеременным" красным гигантам, меняющим блеск только за счет внутренних процессов. 28% – это нижний предел числа звезд, достигших стадии АВГ, имеющих планетные системы. Многие звезды (как, например, V838 Единорога) могли поглотить близкие планеты еще на ранней стадии перехода к красным гигантам. Не во всех планетных системах были планеты на "подходящих" орбитах (с большой полуосью от 1 до 2 а.е.), которые как раз и создают эффект "миридной" переменности. Тем не менее полученная оценка представляет интерес. Статистика открытых планетных систем указывает, что планетами могут обладать от 50 до 70% звезд главной последовательности в окрестностях Солнца. Так что доля мирид среди звезд на ветви АВГ, возможно, не такой уж плохой индикатор общего числа звезд солнечного типа с планетами в нашей Галактике.

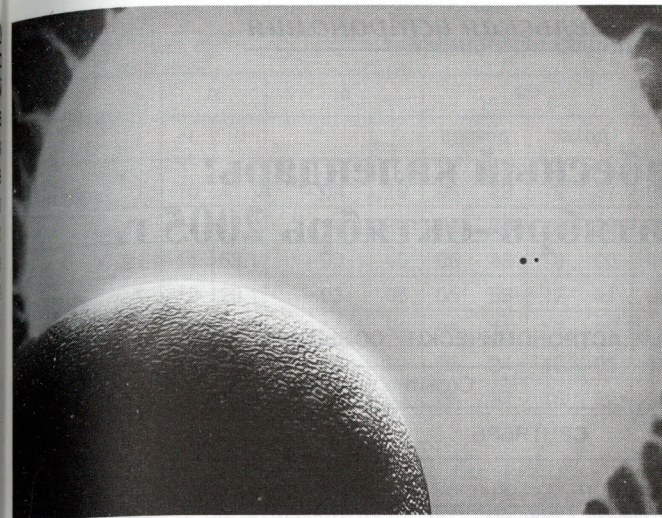
ДОЖИВЕТ ЛИ ЧЕЛОВЕЧЕСТВО ДО "КРАСНОГО СОЛНЦА"?

Трудно предугадать, как будет выглядеть наша Земля к тому времени, когда Солнце вступит в ста-

дию красного гиганта. Будут ли обитать на ней потомки нынешних людей, сохранится ли на Земле какая-нибудь жизнь? Весомый неутешительный вывод делают некоторые исследователи: человечество исчезнет даже в том случае, если Землю не постигнет ближайшее время глобальная космическая катастрофа. Одни отводят человечеству более 200 тыс. лет, другие – 2 тыс. лет или даже десятки лет (Земля, Вселенная, 2005, № 2). Загрязнение среды обитания, антропогенное изменение климата, новые болезни, войны, терроризм, природные и техногенные катастрофы могут привести человечество к гибели.

Герберт Уэллс в романе "Машина времени" писал, что свидетелями разрастания Солнца до красного гиганта будут огромные кребы и бабочки; человекоподобных существ к тому времени, по его мнению, на Земле не останется. Будет это не через 30 млн. лет, как полагал Уэллс, а значительно позднее, через 5,7 млрд. лет, после чего остатки земной биосферы сгорят в пламени нашего светила.

Возможен и другой вариант. Если Солнце, превратившись в красный гигант, будет терять массу достаточно быстро, то орбита Земли изменится. Большая полуось увеличится, например, до нынешней орбиты Марса. Земля избежит опасной гибели, она не истощится в атмосфере Солнца, а замерзнет, когда Солнце, сбросив конвективную оболочку, станет белым



карликом и не сможет больше обогревать свою планету. Правда, и до этого времени Земле дожить будет сложно. Солнце на стадии красного гиганта повысит температуру планеты более чем до 100°C. Океаны испарятся. Когда начнется процесс потери массы нашим светилом со скоростью около $10^{-6} M_{\odot}$ в год, на Землю обрушится поток газа и "солнечной"

пыли. Этот поток не оставит больше обогреть свою планету. Правда, и до этого времени Земле дожить будет сложно. Солнце на стадии красного гиганта повысит температуру планеты более чем до 100°C. Океаны испарятся. Когда начнется процесс потери массы нашим светилом со скоростью около $10^{-6} M_{\odot}$ в год, на Землю обрушится поток газа и "солнечной"

НОВЫЕ КНИГИ

"Астрономия для умных детей"

Так называется новая серия книжек **Е.П. Левитана** для учащихся младших классов, первую часть которой московское издательство "Белый город" (тел. 780-39-11) выпустило в на-

чале 2005 г. Сюда вошли четыре книжки о **Солнце, Луне, Солнечной системе и звездах**.

Дети могут читать их самостоятельно или под руководством родителей и учителей. В последнем случае, основываясь на материале этих книжек, можно проводить факультативные занятия с учащимися III–IV кл. Подобные занятия существенно расширят и углубят знания по астрономии, которые дети получают при изучении таких учеб-

"Последние дни Земли". Художник Джон Уотмоу (1999 г.).

(10^{-5} см). В земной атмосфере они будут оседать крайне медленно и надолго закроют поверхность планеты от солнечных лучей. Земля станет пыльной и темной и, в конце концов, высохшая, безжизненная уйдет в холод и мрак.

Грустные пророчества имеют под собой реальную основу. О том же говорит и молчание космоса. До сих пор попытки найти сигналы внеземных цивилизаций не имели успеха. Если у человечества хватит разума остановить безумное разрушение собственного дома, возможно, оно будет развиваться дальше. Мрачные прогнозы о будущем Земли и земной цивилизации лишние раз напоминают, что необходимо беречь прекрасный и хрупкий мир, который нам достался от Великого Космоса.

ных предметов, как "Окружающий мир" и "Природоведение".

Наиболее целесообразно читать книжки (или работать с ними на факультативах) в следующем порядке: "Твое Солнышко", "Луна – внучка Солнышка", "В семье Солнышка танцуют все", "Звезды – Солнышкины сестрички".

Готовится к изданию вторая часть серии, в которую войдут три книжки об **астероидах, кометах и метеоритах**.

Небесный календарь: сентябрь–октябрь 2005 г.

ОСНОВНЫЕ АСТРОНОМИЧЕСКИЕ СОБЫТИЯ

Дата	Время, ч	Событие
СЕНТЯБРЬ		
1	2.6	Луна в апогее
1	3.0	Уран в противостоянии с Солнцем
2	12.1	Венера в 1° южнее Юпитера
2	9.5	Луна в 3° севернее Меркурия
3	18.8	Новолуние
7	9.0	Луна в 1° южнее Венеры
11	11.6	Луна в фазе первой четверти
15	7.6	Луна в 4° южнее Нептуна
16	13.9	Луна в перигее
16	21.0	Луна в 2° южнее Урана
18	2.0	Полнолуние
18	2.6	Меркурий в верхнем соединении с Солнцем
22	6.5	Луна в 6° севернее Марса
22	22.4	<i>Осеннее равноденствие</i>
25	6.7	Луна в фазе последней четверти
28	5.1	Луна в 4° севернее Сатурна
28	15.3	Луна в апогее
30	—	Максимум блеска долгопериодической переменной звезды S Северной Короны
ОКТАБРЬ		
1	9.7	Марс переходит от прямого движения к попятному
3	10	Кольцеобразное солнечное затмение
3	10.5	Новолуние
7	6.5	Луна в 1° южнее Венеры
8	16	Максимум активности метеорного потока Дракониды
9	—	Максимум блеска долгопериодической переменной звезды R Водолея
10	19.0	Луна в фазе первой четверти
12	14.7	Луна в 4° южнее Нептуна
14	4.5	Луна в 2° южнее Урана
14	14.0	Луна в перигее
14	—	Максимум блеска долгопериодической переменной звезды R Гидры
17	12.1	Частное лунное затмение
17	12.2	Полнолуние
19	13.1	Луна в 5° севернее Марса
21	—	Максимум активности метеорного потока Ориониды
22	12.9	Юпитер в соединении с Солнцем
25	1.3	Луна в фазе последней четверти
25	16.7	Луна в 4° севернее Сатурна
26	9.6	Луна в апогее
26	22.0	Нептун переходит от попятного движения к прямому
30	4	Марс на наименьшем расстоянии от Земли — 0.464 а.е.

Примечание. Во всех таблицах и тексте дано Всемирное время UT (кроме особо оговоренных случаев).

ЭФЕМЕРИДЫ СОЛНЦА

Дата	α		δ		45°		55°		65°	
	ч	м	°	'	восход	заход	восход	заход	восход	заход
Сентябрь 1	10	41.1	+ 08	19	05 22	18 37	05 06	18 53	04 39	19 19
11	11	17.2	+ 04	36	05 34	18 19	05 25	18 27	05 10	18 42
21	11	53.1	+ 00	45	05 46	18 00	05 44	18 02	05 40	18 05
Октябрь 1	12	29.1	− 03	08	05 58	17 41	06 03	17 36	06 10	17 29
11	13	05.6	− 06	59	06 11	17 22	06 22	17 11	06 41	16 52
21	13	42.8	− 10	39	06 24	17 05	06 42	16 47	07 12	16 16
31	14	21.2	− 14	04	06 37	16 50	07 02	16 25	07 46	15 41

Пример. Определить время захода Солнца 17 октября 2005 г. в Омске (широта 54°58', долгота 04°54", 5-й часовой пояс).

С помощью таблицы "Эфемериды Солнца" интерполируем по широте и дате среднее солнечное время захода Солнца на 17 октября,

получаем 16°57". Вычтем из этого значения долготу места, затем прибавим номер часового пояса, один час для учета декретного времени и еще час для учета летнего времени, получаем 19°03".

ЭФЕМЕРИДЫ ПЛАНЕТ

Дата	α		δ		m	d	f	45°	55°	65°	Период	
	ч	м	°	'		"						
Меркурий												
Сентябрь	1	09	44.3	+ 14	46	−0.9	6.0	0.75	0.9	0.8	—	Утро
	11	10	55.9	+ 08	47	−1.4	5.1	0.97	—	—	—	
	21	12	04.1	+ 01	00	−1.4	4.8	1.00	—	—	—	
Октябрь	1	13	05.9	−06	40	−0.7	4.8	0.96	—	—	—	
	11	14	03.8	−13	29	−0.3	5.0	0.91	—	—	—	
	21	14	59.6	−19	03	−0.2	5.4	0.83	—	—	—	
	31	15	51.9	−22	57	−0.1	6.2	0.70	—	—	—	
Венера												
Сентябрь	1	13	04.6	−06	56	−3.9	14.6	0.74	1.4	0.6	—	Вечер
	11	13	47.7	−11	50	−4.0	15.6	0.71	1.4	0.6	—	Вечер
	21	14	31.5	−16	20	−4.1	16.7	0.68	1.5	0.7	—	Вечер
Октябрь	1	15	16.6	−20	15	−4.1	18.1	0.64	1.6	0.8	—	Вечер
	11	16	02.8	−23	24	−4.2	19.7	0.60	1.8	1.0	—	Вечер
	21	16	49.5	−25	38	−4.3	21.6	0.56	2.0	1.2	—	Вечер
	31	17	35.9	−26	51	−4.4	24.0	0.51	2.3	1.5	—	Вечер
Марс												
Сентябрь	1	03	01.8	+ 14	19	−1.1	14.1	0.87	8.1	8.1	7.9	Ночь
	11	03	14.6	+ 15	17	−1.3	15.3	0.89	8.8	9.1	9.1	Ночь
	21	03	23.0	+ 16	00	−1.5	16.5	0.91	9.6	10.0	10.3	Ночь
Октябрь	1	03	26.2	+ 16	28	−1.7	17.8	0.93	10.4	11.0	11.6	Ночь
	11	03	23.4	+ 16	39	−1.9	19.0	0.96	11.4	12.0	12.8	Ночь
	21	03	14.7	+ 16	34	−2.1	19.9	0.98	12.3	13.0	14.0	Ночь
	31	03	01.6	+ 16	14	−2.3	20.2	1.00	13.1	13.8	15.1	Ночь

ЭФЕМЕРИДЫ ПЛАНЕТ

Юпитер											
Сентябрь	1	13	10.0	-06	14	-1.8	31.8	1.00	1.2	-	-
	11	13	17.2	-06	59	-1.7	31.4	1.00	0.8	-	-
	21	13	24.8	-07	45	-1.7	31.0	1.00	0.1	-	-
Октябрь	1	13	32.6	-08	32	-1.7	30.8	1.00	-	-	-
	11	13	40.7	-09	19	-1.7	30.6	1.00	-	-	-
	21	13	48.9	-10	06	-1.7	30.6	1.00	-	-	-
	31	13	57.2	-10	52	-1.7	30.6	1.00	-	-	-
Сатурн											
Сентябрь	1	08	33.2	+19	09	0.3	16.7	1.00	2.4	2.7	3.1
	11	08	37.8	+18	53	0.3	16.8	1.00	3.3	3.6	4.3
	21	08	42.0	+18	39	0.4	17.1	1.00	4.1	4.6	5.5
Октябрь	1	08	45.8	+18	25	0.4	17.3	1.00	4.9	5.5	6.6
	11	08	49.0	+18	14	0.3	17.6	1.00	5.8	6.5	7.7
	21	08	51.7	+18	05	0.3	17.9	1.00	6.6	7.4	8.9
	31	08	53.8	+17	58	0.3	18.2	1.00	7.4	8.3	10.0

Примечание. В таблице координаты α и δ даны на 0^h UT.

ВИДИМОСТЬ ПЛАНЕТ

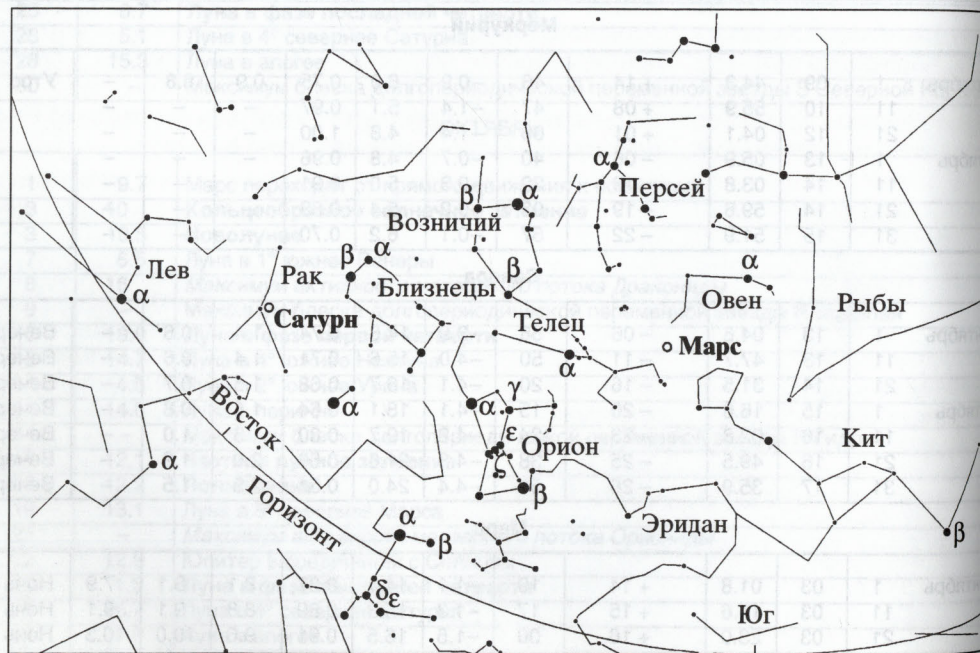
Меркурий можно увидеть только в первые дни сентября на рассвете на востоке.

Венера будет появляться на фоне вечерней зари на юго-западе невысоко над горизонтом.

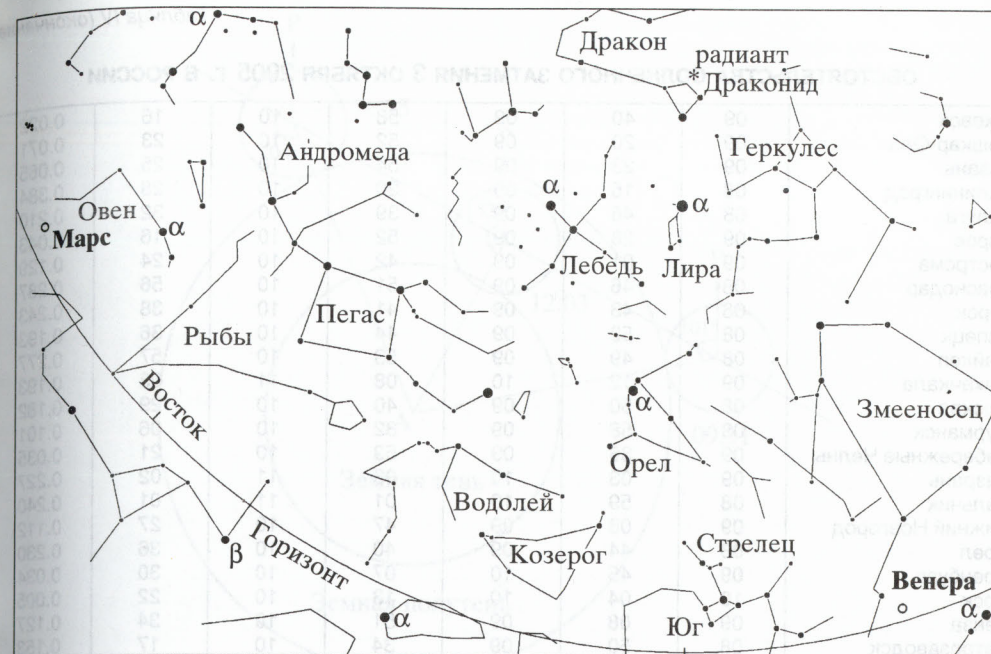
Марс великолепно виден практически всю ночь высоко над горизонтом вблизи границы созвездий Овна и Тельца.

Юпитер едва заметен ранним вечером, западе в созвездии Девы.

Сатурн можно наблюдать во второй половине ночи в созвездии Рака.



Вид звездного неба 15 сентября в Москве (05^h по московскому времени). Показано положение Марса и Сатурна.



Вид звездного неба 25 октября в Москве (19^h по московскому времени). Видны Венера и Марс.

ЗАТМЕНИЯ

В октябре 2005 г. произойдут два затмения — кольцеобразное солнечное и частное лунное.

Кольцеобразное солнечное затмение 3 октября 2005 г. можно будет увидеть в районах Атлантического и Индийского океанов, Средиземного моря, Пиренейского полуост-

рова (например, в Мадриде) и в Африке. Максимальная фаза кольцеобразного затмения (0.96) будет видна на территории Судана в 10^h31^m по Всемирному времени на высоте 71°. Продолжительность кольцеобразного затмения здесь достигнет 4^m32^s.

Частную фазу солнечного затмения можно увидеть на большей части территории

Таблица IV

ОБСТОЯТЕЛЬСТВА СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 3 ОКТЯБРЯ 2005 г. В РОССИИ

Город	Момент затмения						Наибольшая фаза, Ф
	Начало		Наибольшая фаза		Окончание		
	ч	м	ч	м	ч	м	
Архангельск	09	07	09	39	10	10	0.081
Астрахань	09	15	10	04	10	52	0.153
Белгород	08	43	09	42	10	41	0.252
Брянск	08	40	09	37	10	35	0.246
Великий Новгород	08	39	09	31	10	24	0.217
Владикавказ	09	03	10	03	11	02	0.230
Владимир	08	58	09	43	10	28	0.149
Волгоград	09	04	09	55	10	46	0.173
Вологда	08	59	09	40	10	21	0.127
Воронеж	08	51	09	45	10	39	0.208
Грозный	09	06	10	04	11	02	0.214
Иваново	09	00	09	43	10	26	0.136

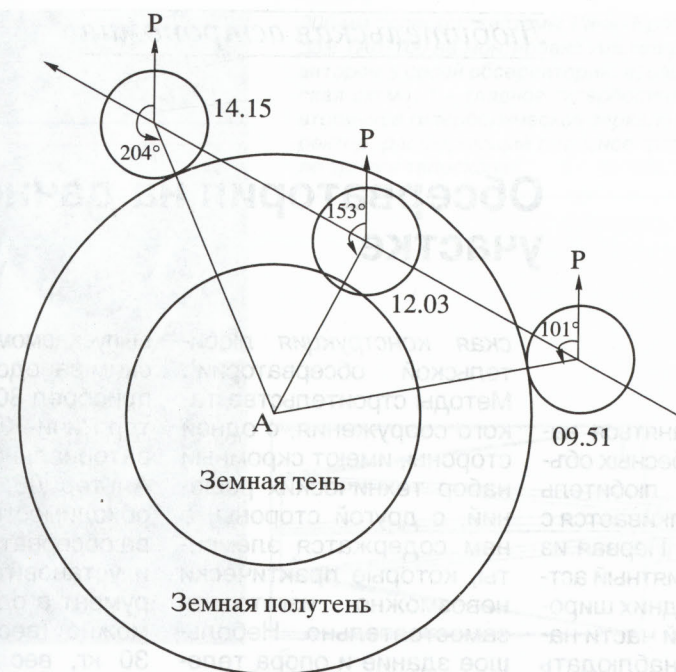
ОБСТОЯТЕЛЬСТВА СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 3 ОКТЯБРЯ 2005 г. В РОССИИ

Ижевск	09	40	09	58	10	16	0.022
Йошкар-Ола	09	20	09	52	10	23	0.071
Казань	09	23	09	54	10	25	0.065
Калининград	08	15	09	20	10	28	0.384
Калуга	08	46	09	39	10	32	0.210
Киров	09	28	09	52	10	16	0.043
Кострома	09	01	09	42	10	24	0.129
Краснодар	08	46	09	51	10	56	0.287
Курск	08	43	09	41	10	38	0.243
Липецк	08	52	09	44	10	36	0.193
Майкоп	08	49	09	53	10	57	0.277
Махачкала	09	12	10	08	11	03	0.193
Москва	08	50	09	40	10	29	0.182
Мурманск	08	58	09	32	10	06	0.101
Набережные Челны	09	36	09	59	10	21	0.035
Назрань	09	03	10	03	11	02	0.227
Нальчик	08	59	10	01	11	01	0.240
Нижний Новгород	09	08	09	47	10	27	0.112
Орел	08	44	09	40	10	36	0.230
Оренбург	09	45	10	07	10	30	0.034
Орск	10	04	10	13	10	22	0.005
Пенза	09	08	09	51	10	34	0.127
Петрозаводск	08	50	09	34	10	17	0.153
Псков	08	33	09	28	10	25	0.255
Ростов-на-Дону	08	49	09	50	10	50	0.251
Рязань	08	54	09	43	10	32	0.171
Самара	09	26	09	58	10	31	0.072
Санкт-Петербург	08	40	09	30	10	21	0.210
Саранск	09	10	09	51	10	31	0.116
Саратов	09	10	09	54	10	38	0.130
Смоленск	08	36	09	33	10	31	0.254
Ставрополь	08	55	09	56	10	56	0.245
Сыктывкар	09	35	09	51	10	06	0.018
Тамбов	08	57	09	47	10	36	0.171
Тверь	08	47	09	37	10	27	0.189
Тольятти	09	23	09	57	10	31	0.078
Тула	08	48	09	41	10	33	0.199
Ульяновск	09	20	09	55	10	29	0.083
Уфа	09	53	10	04	10	16	0.099
Чебоксары	09	18	09	51	10	25	0.081
Черкесск	08	55	09	57	10	59	0.254
Элиста	09	02	09	58	10	53	0.201
Ярославль	08	58	09	41	10	25	0.141

ОБСТОЯТЕЛЬСТВА ЧАСТНОГО ЛУННОГО ЗАТМЕНИЯ 17 ОКТЯБРЯ 2005 г.

Явление	Т		РА
	ч	м	
Вступление Луны в полутень	09	51	101
Начало частного теневого затмения	11	34	137
Момент наибольшей фазы	12	03	153
Окончание частного теневого затмения	12	32	168
Выход Луны из полутени	14	15	204

Примечание. Позиционный угол РА – угол с вершиной в центре диска Луны между направлениями на Северный полюс мира и центр земной тени – отсчитывается против вращения часовой стрелки.



Путь Луны через земную тень во время частного теневого лунного затмения 17 октября 2005 г. (РА – позиционный угол).

Европы и Африки, на юго-западе Азии, с поверхности Атлантического и Индийского океанов. Его небольшие фазы будут видны и в европейской части России (кроме северо-востока). У нижнего правого края солнечного диска появится "ущерб". Самой большой на территории России фаза частного затмения будет в западных и юго-западных районах (в Калининградской области – до 0.4), а на востоке диск Луны едва заденет Солнце.

Частное теневое лунное затмение 17 октября будет видно в Сибири в вечерние часы. На Урале Луна взойдет над горизонтом уже после начала теневого затмения. На востоке Европейской части России наблюдать можно будет только слабо заметные заключительные полутеневые фазы.

Теневое затмение продлится около часа. При этом в тень погрузится лишь южный край диска Луны (фаза 0.069). Угловой диаметр Луны составит 32.2', угловой радиус земной тени – 88.2', а земной полутени – 153.7'.

МЕТЕОРНЫЙ ПОТОК ДРАКОНИДЫ

Максимум этого потока ожидается 8 октября 2005 г. Обычно Дракониды – не очень

сильный поток, но во время приближения к Солнцу кометы Джакобини-Циннера (21P), его прародительницы, он становится во много раз активнее. В 1933 г. и 1946 г. наблюдались даже метеорные дожди Драконид. Последнее возвращение кометы произошло в 1998 г., тогда в восточных регионах России наблюдался всплеск активности до 700 метеоров в час. Теперь комета Джакобини-Циннера вновь возвращается (Земля и Вселенная, 2005, № 3), и вспышка активности Драконид может повториться. Радиант потока ($\alpha = 262^\circ$, $\delta = +54^\circ$) находится недалеко от Северного полюса эклиптики. В вечерние часы он будет располагаться вблизи зенита. Максимум активности ожидается 8 октября в 16^ч по Всемирному времени, когда на европейской части России как раз наступит вечер. Активность Драконид продлится с 6 по 10 октября. Метеоры этого потока медленные (скорость 20 км/с), что позволяет отличить их от метеоров спорадического фона.

О.С. УГОЛЬНИКОВ

Обсерватория на дачном участке

ЗАЧЕМ НУЖНА ОБСЕРВАТОРИЯ

Собираясь заняться наблюдениями небесных объектов, каждый любитель астрономии сталкивается с рядом проблем. Первая из них — неблагоприятный астроклимат. В средних широтах европейской части нашей страны наблюдать небо в телескоп удается всего лишь несколько раз в году. Вторая проблема — подготовка к наблюдениям: сборка техники, вывоз ее на место наблюдения, установка и т.д., на что тратится драгоценное астрономическое время. Выход из этой ситуации — стационарное размещение инструмента в обсерватории, которую чаще всего приходится строить самому. Сейчас, правда, можно купить разборную обсерваторию. Однако стоимость ее слишком велика, а недостатки конструкции весьма существенны.

ОБСЕРВАТОРИЯ КЛАССИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ

В литературе по любительскому телескопостроению приведена классическая

конструкция любительской обсерватории¹. Методы строительства такого сооружения, с одной стороны, имеют скромный набор технических решений, с другой стороны, в нем содержатся элементы, которые практически невозможно изготовить самостоятельно. Небольшое здание и опора телескопа такой обсерватории стоят на разных фундаментах, чтобы уменьшить вибрацию инструмента из-за движения наблюдателя и ветра. Перекрытие весьма невысокого второго этажа, на котором устанавливался инструмент, рекомендуется делать деревянным с открывающимся люком. Венчает сооружение купол, изготовленный либо из металла, либо из досок или пластика, вращающийся на некоем рельсе. Такие строения требовали наименьших затрат, но и возможностей давали сравнительно немного.

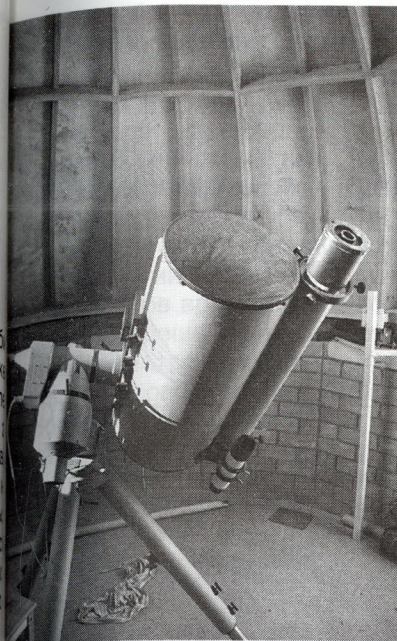
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОБСЕРВАТОРИИ

Я начинал астрономические наблюдения, как и многие любители, на небольшом телескопе ТАЛ120,

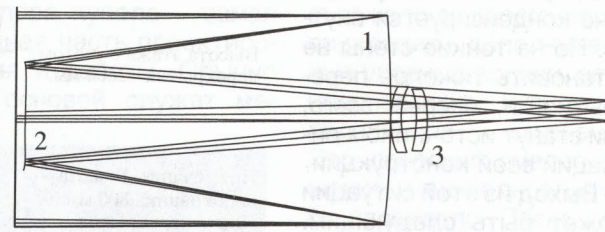
выпускаемом новосибирским заводом. Когда же приобрел 300-мм рефлектор Ричи-Кретьена на ваториальной монтировке Альтер Д6, возникла необходимость строительства обсерватории. Вынести и установить такой инструмент в одиночку невозможно (вес телескопа 30 кг, вес монтировки 78 кг).

Я решил спроектировать обсерваторию с купольной конструкцией, в которой могут разместиться 0.5-м телескоп и одно или несколько наблюдателей. Доступ к инструменту через люк в куполе не устраивал. Более комфортный вход обеспечивает винтовая лестница. С другой стороны, стоимость строительства должна быть невысокой.

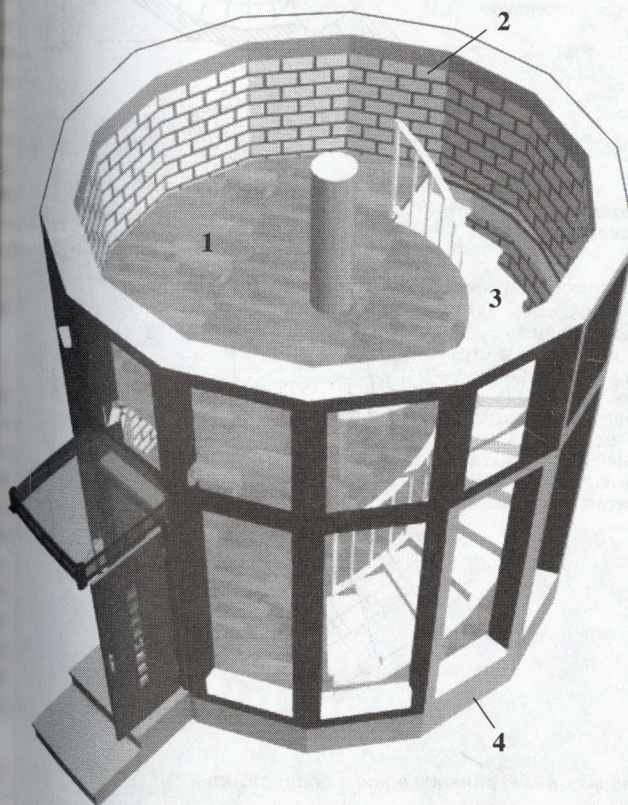
В классических конструкциях опорой телескопа обычно служит труба, наполненная песком, гравием или каким-либо другим наполнителем для снижения вибрации. Если так, то «карандаш» сделать вы не сможете, что необходимо для максимального обзора. В нем могут развиваться колебания, которые позволят проводить не-



300-мм телескоп системы Ричи-Кретьена (РК300) с гидом ТАЛ-100 на монтировке Альтер Д6, установленный автором в своей обсерватории: а) общий вид; б) оптическая схема: 1 — главное гиперболическое зеркало; 2 — вторичное гиперболическое зеркало; 3 — линзовый корректор, расширяющий полезное фотографическое поле зрения телескопа.



б



зудные, ни тем более фотографические наблюдения. Поэтому я решил сделать стены сооружения несущими и без каких-либо других опор, заменив их достаточно надежным перекрытием. Оно должно быть очень тяжелым (в десятки раз превосходить вес человека) и виброустойчивым. Лучше всего отлить перекрытие из бетона, армировав стальными балками для придания необходимой формы и целостности, а затем положить его на прочную стену, например из кирпича.

При выборе материала для стен нужно учесть, что для устранения нелю-

Эскиз обсерватории. Здание имеет форму многогранника. Тяжелое перекрытие (1) опирается на кирпичную стену (2). Комфортный доступ к инструменту обеспечивает лестница (3). Сооружение стоит на фундаменте (4).

¹ Навашин М.С. Телескоп астронома-любителя. — 4-е изд. — М.: Наука, 1979; Сикорук Л.Л. Телескопы любителей астрономии. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Наука, 1989.

бимых астрономами тепловых потоков, помещение под обсерваторией не отапливается. Поэтому толщину несущих стен из некоторых материалов в таком случае следует ограничить. При толстых стенах влага, замерзающая внутри кирпича, разрушает его в течение очень короткого срока (5–10 лет). Если стена тонкая, то влага успевает испаряться и не конденсируется внутри. Но на тонкие стены не установить тяжелое перекрытие, и, скорее всего, они станут источником вибраций всей конструкции.

Выход из этой ситуации может быть следующим. Вспомним, что кирпичная заводская труба высотой до 100 м и более выдерживает сильнеешие ветровые, термические и статические нагрузки. Такие трубы стоят десятки лет. Круглое сечение сооружения по сравнению с квадратным выдерживает гораздо большую нагрузку. Но еще более мощную нагрузку вынесут стены с многогранным сечением. Учитывая это, можно сделать стены такой толщины, чтобы они выдержали тяжесть перекрытия и не были подвержены разрушению постоянно замерзающей и оттаивающей влагой. Здание обсерватории в форме многогранника с бетонным перекрытием я и построил. Поставив сооружение на фундамент (в соответствии со строительными нормами), залил бетоном и армировал пол первого этажа. В итоге получился "запаянный граненый стакан", кото-

Примечание.
Фундамент ленточный.

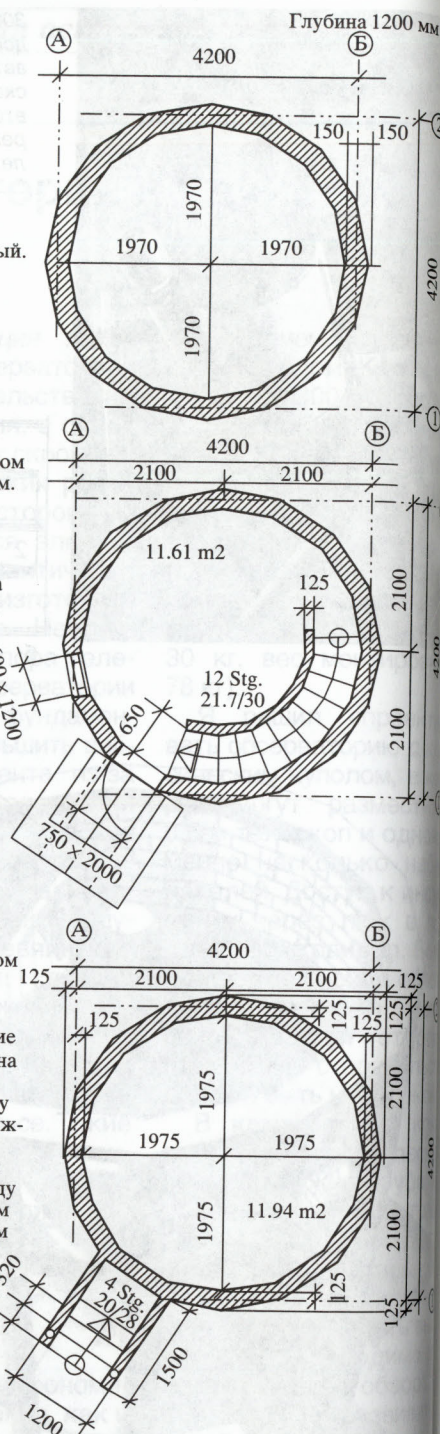
Высота этажа с учетом
перекрытия +2600 мм.

Примечание. Высота
подоконника 800 мм.
Плита перекрытия
толщиной 200 мм.
Над лестницей
проем. Ширина
проема 650 мм.
Начало проема над
третьей ступенькой
снизу.

Высота этажа с учетом
перекрытия + 400

Примечание. Строение
имеет 16 граней. Длина
каждой грани по
внутреннему диаметру
равна 770 мм, по наруж-
ному – 870 мм.
Толщина перекрытия
100 мм. Полость между
землей и перекрытием
засыпать выкопанным
грунтом и песком.

Горизонтальные сечения здания обсерватории.



рый способен выдержать фантастические нагрузки вдоль оси. Размер грани стены удобно сделать типового размера дверной коробки (60, 80 или 100 см).

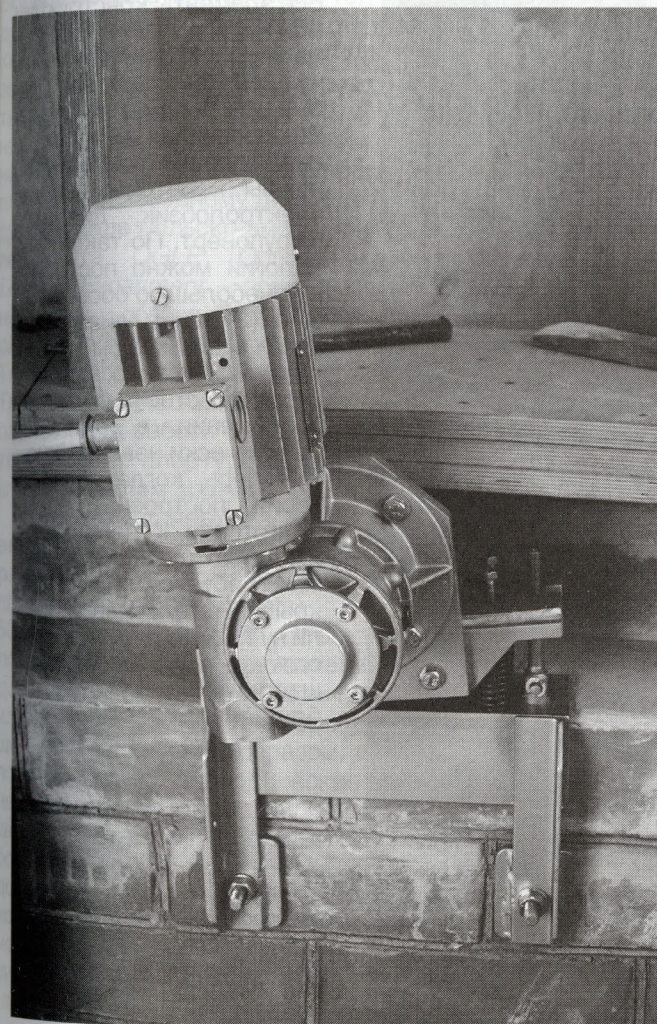
Самый сложный вопрос – как сконструировать купол (от выбора материала до технологии креплений и механизмов вращения)? Известное решение – купол обсерватории изготовить из тесового каркаса и обшить небольшими досками, по виду напоминающими паркет или современную вагонку. Эта тех-

нология позволяет сделать элементы купола вручную. Нарезанные по заготовкам и склеенные между собой элементы из 20-мм фанеры – прекрасный каркас для купола, обладающего прочностью, влагостойкостью и эстетичностью. Для нарезки и сборки такого каркаса требуются электрический лобзик, шуруповерт и саморезы.

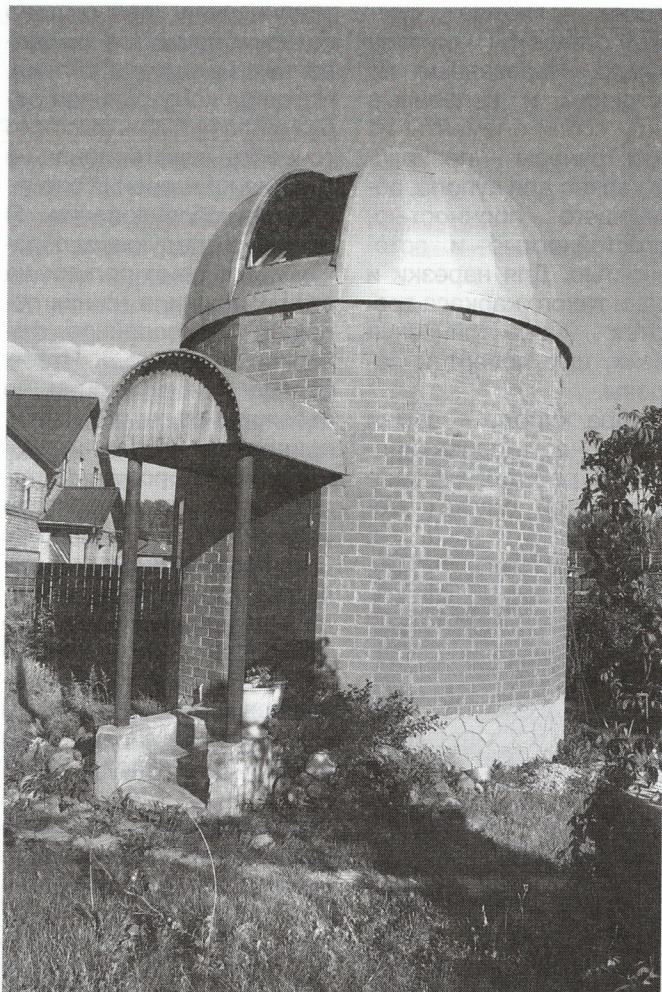
Опора купола – самая трудная часть проектирования и работы. Обычно его основой служат ме-

таллические рельсы, по которым движутся закрепленные на куполе ролики. Но такая конструкция подразумевает очень высокую точность изготовления и требует применения специального оборудования. Я поступил следующим образом: установил ролики на стенах башни, а на них положил многослойное фанерное кольцо. Чтобы кольцо при вращении не съезжало со своего места, прикрепил дополнительные упорные ролики, останавливающие купол при радиальном смещении. Это довольно смелое решение, и оно полностью себя оправдало. После того как опорное кольцо легло на место и свободно вращается, можно на нем смонтировать каркас всей конструкции купола. И, наконец, нужно обшить каркас тонкой листовой фанерой и тонким оцинкованным железом.

Еще один момент, который необходимо учесть, – это эффективная ветровая защита купола. Часто рекомендуют крепить его тросами и различными замками. Но это не самый надежный способ. Защита должна функционировать и в рабочем положении при наблюдениях, обеспечивая свободное вращение купола. Вот мой вариант такой защиты. Над кольцом с небольшим зазором в 5–7 мм устанавливается шторм-захват в виде стальных уголков, имеющих мощное анкерное крепле-



Электропривод вращения купола и опорное кольцо.



Общий вид обсерватории, построенной автором.

ние в перекрытии и притянутых к стене. Такой угол не мешает вращаться куполу, но в случае его отрыва от опорных роликов не даст подняться выше чем на 5 мм. Такие захваты обеспечат надежное противостояние ветру.

Думаю, что моя любительская обсерватория обладает большими преимуществами перед многими другими вариантами. Во-первых, это доступность материалов и технологий. Все элементы конструкции можно изготовить в домашних условиях. Купить нужно только ролики. Они бывают различных видов. Во-вторых, из оборудования для строительства нужны бетономешалка, электролобзик, дрель и шуруповерт. По такой технологии можно построить как небольшую обсерваторию (2–3 м в диаметре) так и с диаметром купола до 6 м. Конечно, осилить строительство большого сооружения в одиночку практически невозможно.

Теперь, когда обсерватория построена, время подготовки к наблюдениям сократилось до минимума. Требуется лишь снять крышки с телескопов и, если нужно, подъюстировать оптику, а затем открыть шторы и приступать к наблюдениям!

С.В. КИСЕЛЕВ
(kiselev@lantelecom.ru)
(Все снимки сделаны автором.)



Шаровое скопление M13 в созвездии Геркулеса. Телескоп РК300, прямой фокус 1/8, Селен 300D ISO1600, выдержка 400 с.

Внесолнечные планетные системы (часть I)

К концу марта 2005 г. число планет, найденных за пределами Солнечной системы, достигло 152. Достоверно известно, что планетные системы есть у 134 звезд, причем у 14 из них — более одной планеты. Большинство этих небесных тел открыты доплеровским методом, по периодическим колебаниям лучевых скоростей звезд. Первые положительные результаты дали и поиски “транзитным” (затменным) методом по периодическим ослаблениям блеска звезд во время прохождения планеты по звездному диску, которые ведутся в ходе польско-американского эксперимента *OGLE* (*Optical Gravitational Lensing Experiment* — поиск гравитационных линз) и обзора *TrES* (*Transatlantic Exoplanet Survey* — Трансатлантический обзор *TrES* (Transatlantic Exoplanet Survey — Трансатлантический обзор внесолнечных планет). Эта работа выполняется на трех телескопах с апертурой всего 10 см, но с широким полем зрения — 6°.

Приведем данные из *Энциклопедии внесолнечных планет Жана Шнейдера* (Медонская обсерватория, Франция, <http://www.obspm.fr/planets>) о первых 50 звездах с планетами. Объекты расположены в порядке возрастания периодов обращения планет. Если планет две или больше, то берется период ближайшей к звезде. Таким образом, в таблицу попали короткопериодические внесолнечные планеты, обращающиеся вокруг своих звезд на очень близких орбитах с большими полуосями a в несколько сотых долей астрономической единицы. Рекорд принадлежит планете *OGLE-TR-56 b* массой 1.45 $M_{Ю}$ (массы Юпитера). Ее период обращения — всего лишь 1.2 суток ($a = 0.0225$ а.е.). На таком расстоянии от

звезды планета очень сильно нагревается. Подобные планеты называют “горячими юпитерами”. Замыкает таблицу планета *HD 101930 b* с периодом 70.46 суток и $a = 0.3$ а.е., она немного ближе к своей звезде, чем Меркурий к Солнцу.

В таблице приводятся расстояния до звезды (в парсеках), звездная величина в видимой области спектра, в фотометрической полосе V (для некоторых звезд — в инфракрасной области, в полосе I , на волне 1.04 мкм), спектральный класс звезды и ее масса в единицах $M_{\odot}$ (массы Солнца). В следующих столбцах даны параметры планет: масса планеты, выраженная в массах Юпитера (масса Юпитера равна 317 массам Земли), большая полуось орбиты a , период обращения P , эксцентриситет e и угол наклона орбиты i к картинной плоскости (плоскости, перпендикулярной лучу зрения). Вместо планетных масс приведены величины $M_p \times \sin i$. Наклонение орбиты i в большинстве случаев неизвестно, но, вероятнее всего, оно не намного отличается от 90° (иначе доплеровский и “затменный” методы не работают). Поэтому значения $M_p \times \sin i$ — хорошее приближение для истинных масс планет, которые на самом деле могут быть лишь немного больше приведенных в таблице. Массы большинства известных экзопланет составляют от 0.5 до 16 $M_{Ю}$, то есть это планеты-гиганты. Только две планеты (55 Рака e и *HD 160691 d*) гораздо легче, их массы примерно такие же, как у Урана или Нептуна.

У некоторых звезд обнаружено несколько планет: две (у *HD 38529*, *Gliese 876*, *HD 11964*, *HD 74156* и *HD 168443*), три (у γ Андромеды и *HD 160691*); четы-

Первые 50 звезд из Каталога внесолнечных планетных систем

№	Название	Рас- стоя- ние, пк	Зв. вел. V	Спект- раль- ный класс	Масса звезд- ды, $M_{\odot}$	Масса плане- ты, $M_{\text{Ю}}$	Большая полуось орбиты a, а.е.	Период обращения планеты P, сут	Экс- центри- ситет e	Накло- нение орбиты i, град.	Год первой публи- кации
1.	OGLE-TR-56 b	1500	16.6	G	1.04	1.45	0.0225	1.2	—	81.0	2002
2.	OGLE-TR-113 b	1500	14.42/	K	0.77	1.35	0.0228	1.43	—	—	2004
3.	OGLE-TR-132 b	1500	15.72/	F	1.35	1.01	0.0306	1.69	—	—	2004
4.	HD 73256 b	36.5	8.08	G8/K0	1.05	1.85	0.037	2.54863	0.038	—	2002
5.	GJ 436 b	10.2	10.68	M2.5	0.41	0.067	0.0278	2.6441	0.12	—	2004
6.	55 Paka b	13.4	5.95	G8V	1.03	0.045	0.038	2.81	0.174	25?	2004
	c					0.84	0.11	14.65	0.02	25?	1997
	d					0.21?	0.24?	44.28?	0.34?	25?	2002
	e					4.05	5.9	5360	0.16	25?	2002
7.	HD 63454 b	35.80	9.37	K4V	0.80	0.38	0.036	2.81782	0	—	2003
8.	HD 83443 b	43.54	8.23	K0V	0.79	0.41	0.04	2.985	0.08	—	2002
9.	HD 46375 b	33.4	7.94	K1IV	1.00	0.249	0.041	3.024	0.04	—	2003
10.	TrES-1 b	157	11.79	K0V	0.87	0.75	0.0393	3.030065	0.0	88.2	2004
11.	HD 179949 b	27	6.254	F8V	1.24	0.84	0.045	3.093	0.05	—	2001
12.	HD 187123 b	50	7.9	G5	1.06	0.52	0.042	3.097	0.03	—	1999
13.	OGLE-TR-10 b	1500	14.93/	G-K	1.22	0.57	0.04162	3.101386	—	98.2	2004
14.	τ Волопаса b	15	4.5	F7V	1.3	3.87	0.0462	3.3128	0.018	—	1997
15.	HD 330075 b	50.20	9.36	G5	0.95	0.76	0.043	3.369	0.0	—	2004
16.	HD 88133 b	74.5	8.0	G5IV	1.2	0.29	0.046	3.415	0.11	—	2003
17.	HD 2638 b	53.71	9.44	G5	0.93	0.48	0.044	3.4442	0	—	2003
18.	BD -10°3166 b		10.0	G4V	1.10	0.48	0.046	3.487	0	<84.3	2001
19.	HD 75289 b	28.94	6.35	G0V	1.05	0.42	0.046	3.51	0.054	—	2001
20.	HD 209458 b	47	7.65	G0V	1.12	0.69	0.045	3.52474541	0.0	86.1	2001
21.	HD 76700 b	59.7	8.13	G6V	1	0.197	0.049	3.971	0.0	—	2002
22.	OGLE-TR-111 b	1500	15.55/	G-K	0.82	0.53	0.047	4.02	—	—	2004
23.	51 Пегаса b	14.7	5.5	G2IV		0.468	0.052	4.23077	0.0	—	1997
24.	ν Андромеды b	13.47	4.09	F8V	1.3	0.69	0.059	4.6170	0.012	—	1997
	c					1.19	0.829	241.5	0.28	—	1997
	d					3.75	2.53	1284.	0.27	—	1997
25.	HD 49674 b	40.7	8.10	G5V	1.0	0.12	0.0568	4.948	0.	—	2001
26.	HD 68988 b	58	8.21	G0	1.20	1.90	0.071	6.276	0.14	—	2001
27.	HD 168746 b	43.12	7.95	G5	0.92	0.23	0.065	6.403	0.081	—	2003
28.	HD 217107 b	37	6.16	G8IV	0.98	1.28	0.07	7.11	0.14	—	1999
29.	HD 162020 b	31.26	9.18	K2V	0.7	13.75	0.072	8.428198	0.277	—	2001
30.	μ Жервения b	15.3	5.15	G3	1.08	0.042	0.09	9.55	0.0	—	2004
	b			IV-V		1.7	1.5	638	0.31	—	2001
	c					3.1	4.17	2986	0.8?	—	2004
31.	HD 130322 b	30	8.05	K0V	0.79	1.08	0.088	10.724	0.048	—	2001

Табл.

Таблица (окончание)

№	Название	Рас- стоя- ние, пк	Зв. вел. V	Спект- раль- ный класс	Масса звезд- ды, $M_{\odot}$	Масса плане- ты, $M_{\text{Ю}}$	Большая полуось орбиты a, а.е.	Период обраще- ния пла- неты P, сут	Эксцен- триситет e	Накло- нение орбиты i, град.	Год первой публи- кации
32.	HD 108147 b	38.57	6.99	F8/G0V	1.27	0.41	0.104	10.901	0.498	—	2002
33.	HD 38529 b	42.43	5.94	G4IV	1.39	0.78	0.129	14.309	0.29	—	2001
	c					12.70	3.68	2174.3	0.36	—	2003
34.	Gliese 86 b	11	6.17	K1V	0.79	4.	0.11	15.78	0.046	—	2000
35.	HD 99492 b	18	7.57	K2V	0.78	0.112	0.119	17.038	0.05	—	2005
36.	HD 27894 b	42.37	9.36	K2V	0.75	0.62	0.122	17.991	0.049	—	2005
37.	HD 195019 b	20	6.91	G3IV-V	1.02	3.43	0.14	18.3	0.05	—	1999
38.	HD 6434 b	40.32	7.72	G3IV	1.0	0.48	0.15	22.09	0.30	—	2003
39.	HD 192263 b	19.9	8.1	K2V	0.79	0.72	0.15	24.348	0.0	—	2003
40.	Gliese 876 c	4.72	10.17	M4V	0.32	0.56	0.13	30.1	0.27	?	2001
	b					1.98	0.21	61.02	0.12	84	1998
41.	HD 102117 b	42	7.47	G6V	0.95	0.18	0.15	20.8	0.08	—	2004
42.	HD 11964 c	33.98	6.42	G5	1.125	0.11	0.23	37.82	0.15	?	2004
	b					0.70	3.17	1940.	0.30	?	2004
43.	ρ Сев. Короны b	16.7	5.40	G0V	0.95	1.04	0.22	39.845	0.04	—	1997
44.	HD 74156 b	64.56	7.62	G0	1.05	1.86	0.294	51.643	0.636	—	2004
	c					>6.17	3.40	2025	0.583	—	2004
45.	HD 117618 b	38	7.18	G2V	1.05	0.19	0.28	52.2	0.39	—	2004
46.	HD 37605 b	42.9	8.69	K0V	0.8	2.4	0.26	55.02	0.677	—	2004
47.	HD 168443 b	33	6.92	G5	1.01	7.7	0.29	58.116	0.529	—	1999
	c					16.9	2.85	1739.50	0.228	—	2001
48.	HD 3651 b	11	5.80	K0V	0.79	0.2	0.284	62.23	0.63	—	2003
49.	HD 121504 b	44.37	7.54	G2V	1.0	0.89	0.32	64.6	0.13	—	2004
50.	HD 101930 b	30.49	8.21	K1V	0.74	0.30	0.302	70.46	0.11	—	2005

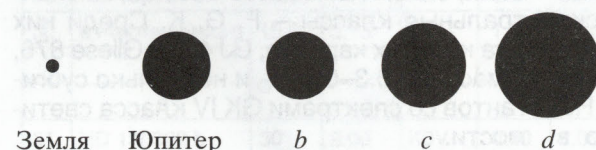
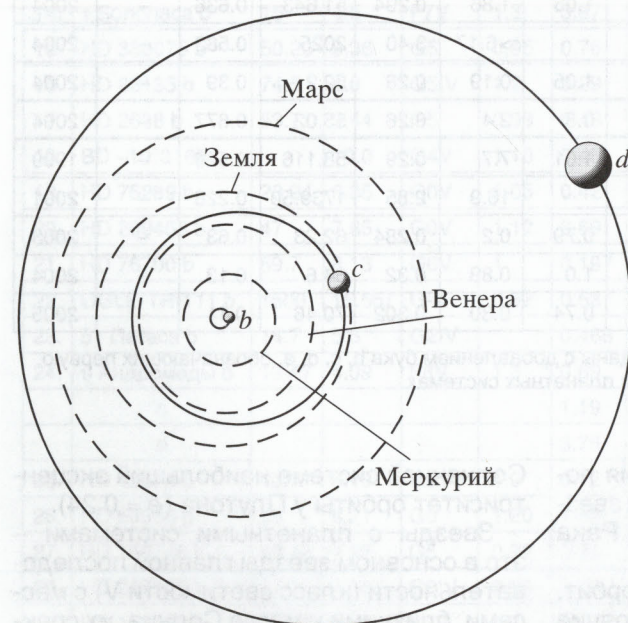
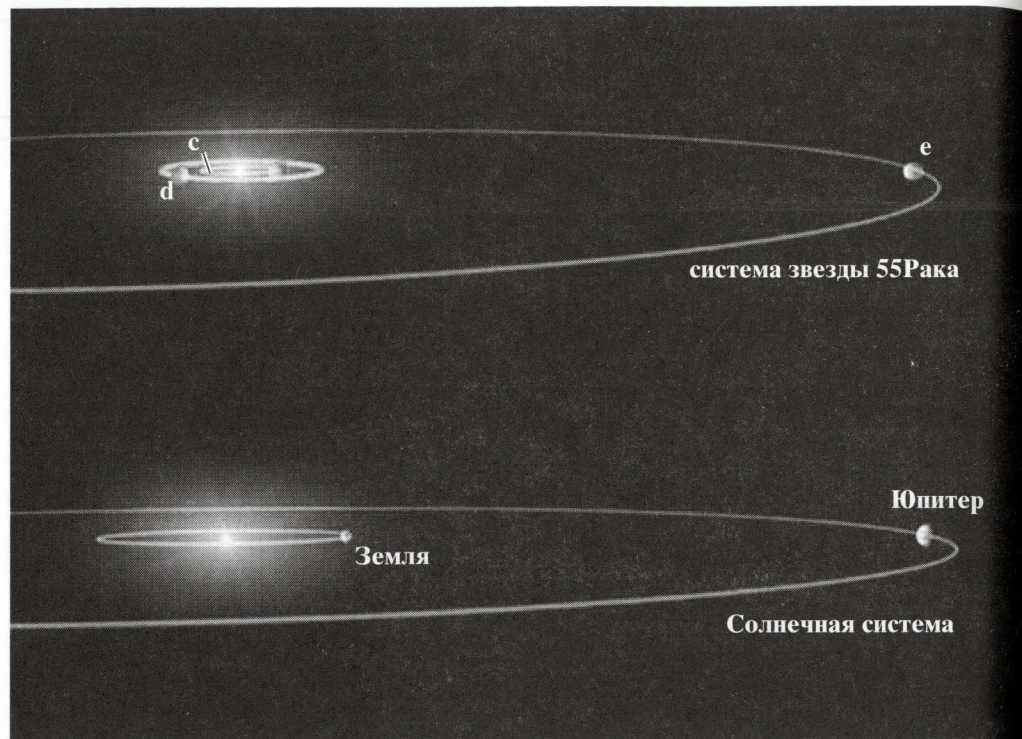
Примечание. В таблице названия звезд даны с добавлением букв b, c, d, e, обозначающих первую, вторую, третью и четвертую планеты в их планетных системах.

ре (у 55 Рака). Периоды обращения последующих (после самой близкой к звезде) планет гораздо длиннее (у 55 Рака d – до 5360 суток, или 14.7 года).

Различны эксцентриситеты орбит. Многие планеты, в том числе “горячие юпитеры”, обращаются по практически круговым орбитам ($e \sim 0$). В то же время есть планеты с очень вытянутыми орбитами ($e > 0.5-0.6$): HD 74156 b, c, HD 37605 b, HD 3651 b. Напомним, что в

Солнечной системе наибольший эксцентриситет орбиты у Плутона ($e = 0.24$).

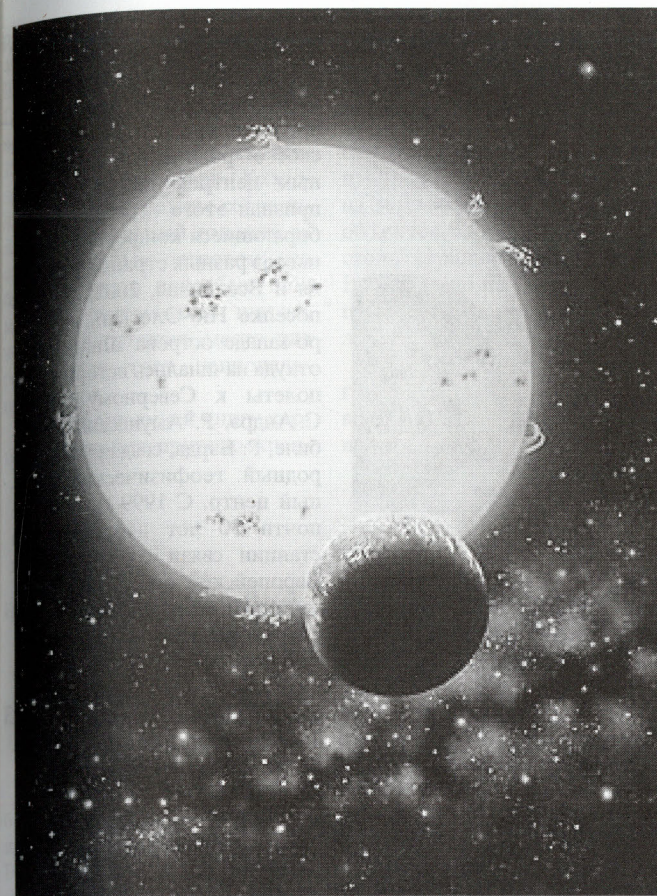
Звезды с планетными системами – это в основном звезды главной последовательности (класс светимости V) с массами, близкими к массе Солнца, их спектральные классы – F, G, K. Среди них два красных карлика, GJ 436 и Gliese 876, с массами 0.3–0.4 $M_{\odot}$ и несколько субгигантов со спектрами GK IV класса светимости.



Орбиты трех планет звезды 55 Рака. Буквами c, d, e обозначены планеты. Орбита ближайшей к звезде планеты b настолько мала, что в данном масштабе не видна. Для сравнения приведено расположение орбит планет Солнечной системы.

В таблице есть несколько примечательных объектов. Среди них звезда 51 Пегаса, которой в 1995 г. К. Майор и Д. Келоз открыли первую вне солнечную планету, а также звезда HD 209458. Существование около нее планеты, найденной доплеровским методом, впервые было подтверждено затменным способом.

Орбиты планет звезды γ Андромеды (b, c, d — планеты). Пунктиром для сравнения показаны размеры орбит Меркурия, Венеры, Земли и Марса. Внизу — сравнительные размеры Земли, Юпитера и планет γ Андромеды b, c и d.



Так художник Линетт Кук изобразила первую из открытых экзопланет (у звезды 51 Пегаса).

Среди недавних открытий заслуживает внимания “горячий юпитер” TrES-1 b — планета, найденная затменным методом (в ходе обзора TrES). Наблюдения по этой программе позволяют обнаружить в красной области спектра у звезд от 8^m до 15^m изменения блеска в пределах 0.002^m—0.001^m, и планета около звезды TrES-1 — ее первый успех. Существование планеты уже удалось независимо подтвердить доплеровским методом.

Среди планетных систем, указанных в таблице, нет ни одной похожей на Солнечную. Значительное большинство объектов в них составляют “горячие юпитеры” — массивные планеты на близких к звездам орбитах. Это объясняется тем, что проще обнаружить планеты большой массы с короткими

Спектроскопические наблюдения во время затмений позволили определить состав атмосферы планеты и показали наличие у нее водородной короны, образовавшейся при испарении планеты. Из-за близости к звезде температура на ее поверхности превышает 1200 К. Астрономы неофициально называют ее Осирис. Согласно легенде, древнеегипетский бог Осирис был убит своим братом.

ми периодами обращения. По мере накопления наблюдательных данных, вероятно, удастся обнаружить небесные тела, более сходные с планетами земной группы.

Г.М. РУДНИЦКИЙ,
кандидат физико-математических наук
ГАИШ МГУ

Продолжение следует.

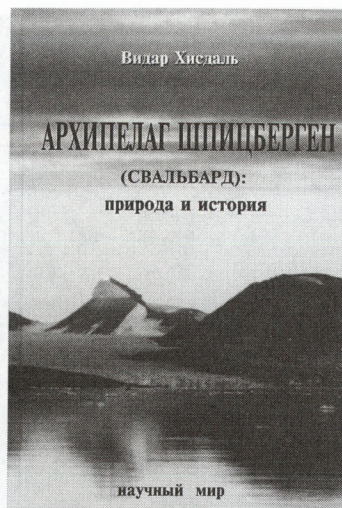
Сага о Свальбарде

Полярные области занимают особое место на Земле, поскольку их природа существенно отличается от той, что характерна для большей ее части. Ландшафты Арктики и Антарктики часто называют "неземными"; они похожи на другие небесные тела, менее пригодные для жизни, чем наша планета. Арктика издавна привлекала тех, кто искал новые земли, места для охоты и морских промыслов, кратчайшие пути между материками и странами.

С конца XVI в. человечеству известен один из полярных архипелагов, которому посвящена вышедшая в 2005 г. на русском языке в московском издательстве "Научный мир" (тел./факс(095)291-2847) книга норвежского географа **Видара Хисдала "Архипелаг Шпицберген (Свальбард): природа и история"** (под редакцией и с послесловием В.А. Маркина).

В составе экспедиций Норвежского полярного института автор провел 28 полевых сезонов на архипелаге, расположившемся прямо на полпути от северных берегов Европы к Северному полюсу, между 74° и 80° с.ш., на северной окраине шельфа Баренцева моря. Особенность этой части Арктики в том, что здесь еще ощущается влияние теплого течения Гольфстрим. Зимы значительно теплее, чем дальше на восток, да и летом более вероятны температуры выше нуля, а поэтому жизнь богаче, чем в других "полярных пустынях". В. Хисдаль называет Свальбард "мягкой Арктикой", имея в виду не только умеренную суровость климата, но и достаточно высокую степень освоенности.

Жители архипелага (их более трех тысяч — норвежцы, россияне и украинцы) находятся



в условиях вполне цивилизованных, хотя и в окружении "неземной" среды. Россия владеет на полярном архипелаге несколькими земельными участками, на которых занимается разработкой месторождений каменного угля. Кроме того, как и все страны, присоединившиеся к международному договору 1920 г., согласно которому Шпицберген был передан под суверенитет Норвегии, она пользуется своим правом на проведение научных исследований.

Существует точка зрения, что первооткрывателями Шпицбергена были викинги, но никаких следов их пребывания не найдено. Между тем на берегах островов встречаются развалины построек и захоронения, оставленные русскими поморами, плававшими на Шпицберген в XVII в. и XVIII в., а может быть и раньше, еще до В. Баренца. Они называли эту землю Грумантом (искаженное Грунланд), считая ее окраиной Гренландии. Археологи доказали, что поморы первыми начали осваивать архипелаг. Автор книги признает этот факт, долгое время оспаривавшийся некоторыми норвежскими учеными.

На протяжении десятилетий на полярном архипелаге постоянно работали экспедиции рос-

сийских гляциологов, геологов, археологов, геофизиков, астрономов. Они сотрудничали с учеными из других стран. В наше время полярный архипелаг стал своего рода международным центром науки. Верным признаком этого — регулярно собирающиеся конференции ученых из разных стран мира (Земельный журнал, 2002, № 1). Самая большая часть погребена под мощным ледниковым щитом, но все же осталось место для размещения трех национальных парков.

Из завершающей книгу карты размещения природоохран- сийских гляциологов, геологов, археологов, геофизиков, астрономов. Они сотрудничали с учеными из других стран. В наше время полярный архипелаг стал своего рода международным центром науки. Верным признаком этого — регулярно собирающиеся конференции ученых из разных стран мира (Земельный журнал, 2002, № 1). Самая большая часть погребена под мощным ледниковым щитом, но все же осталось место для размещения трех национальных парков.

Около сотни цветных фотографий, иллюстрирующих книгу, представляют различные уголки природы Свальбарда (Шпицбергена), его геологический рельеф, ледники, животный и растительный мир, населенные пункты — норвежские и российские. Мы видим те самые остро- конечные горы над ледяными равнинами, облик которых по- сказал голландцу Виллему Ва-

ренцу название открытого его экспедицией в 1596 г. острова — Шпицберген (*Острые горы*). Потом так стали именовать весь архипелаг. Присвоив в 1969 г. ему старинное скандинавское имя Свальбард (*Холодный берег*), норвежцы сохранили первоначальный топоним за самым крупным островом; его большая часть погребена под мощным ледниковым щитом, но все же осталось место для размещения трех национальных парков.

Из завершающей книгу карты размещения природоохран-

НОВЫЕ КНИГИ

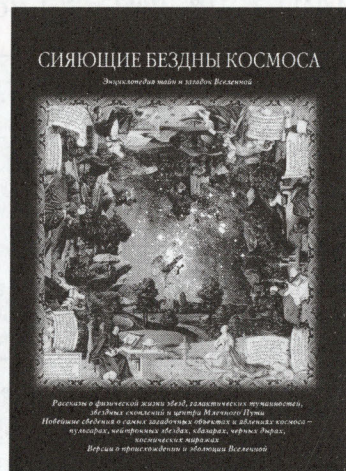
Вселенский вернисаж

Свою очередную книгу-альбом **С.И. Дубкова** назвала "**Сияющие бездны Космоса**" (М.: Белый город, 2004). Книга, заявленная как "Энциклопедия тайн и загадок Вселенной", содержит рассказы о жизни звезд, звездных скоплений и туманностей, новейшие сведения о пульсарах, квазарах и черных дырах, версии о происхождении и эволюции Вселенной.

В книге пять частей: "Творцы физической картины мира", "Ключи от неба", "Среди звезд", "Галактика по имени Млечный Путь", "Апофеоз гравитации". Это издание посвящено виртуозному танцовщику Николаю Цискаридзе и открывается фотографиями нескольких балетных сцен, что, по-видимому,

ных зон можно узнать, что на относительно небольшом пространстве расположились 7 национальных парков и природных резерватов, несколько зон охраны флоры и 16 заповедных птичьих базаров. Трудно найти на Земле регион с таким числом объектов защиты природы на столь ограниченной площади. Не случайно на Свальбарде успешно развивается именно экологический туризм.

Наряду с красочными фотографиями уникальной природы, в книгу включены сугубо научные, на первый взгляд, иллюст-



считается творческой находкой автора и талантливого художника Натальи Марковой. Необычно и остальное оформление книги, которая включает множество репродукций известных картин и впечатляющих современных фотографий различных небесных объектов.

рации: профиль ледникового покрова, фрагменты океанографических, синоптических и геологических карт, геохронологическая шкала, данные наблюдений метеорологических станций и показатели освещенности в высоких широтах в различные сезоны. Сделано это с соблюдением меры, так что книга остается популярной, интересной не только специалистам, но и любому читателю.

Думаю, что не имеет смысла (да и вряд ли возможно) кратко пересказывать содержание книги. Ее нужно прочитать, критически сопоставляя текст с иллюстративным материалом. Такое чтение принесет пользу прежде всего начинающим любителям астрономии. Они наверняка обратят внимание на интересные факты, относящиеся к истории астрономии и достижениям современной астрофизики, внегалактической астрономии и космологии. Это немало, поскольку потом любители астрономии могут получить более глубокую информацию по заинтересовавшим их вопросам. Например, им будут полезны новые научно-популярные книги, рецензии на которые появились в "Земле и Вселенной", и, конечно, соответствующие проблемные статьи, опубликованные на страницах нашего журнала.

Е.П. ЛЕВИТАН

Дорогие читатели!

*Напоминаем, что подписаться на журнал
“Земля и Вселенная” вы можете с любого
номера по Объединенному каталогу “Пресса
России” (II полугодие 2005 г.) во всех отделе-
ниях связи. Подписной индекс – 70336.*

Заведующая редакцией Г.В. Матросова
Зав. отделом астрономии Г.Н. Яшина
Зав. отделом наук о Земле В.А. Маркин
Зав. отделом космонавтики С.А. Герасютин

Художественные редакторы О.Н. Никитина, М.С. Вьюшина
Литературный редактор О.Н. Фролова
Оператор ПК Н.Н. Токарева
Корректор Г.В. Печникова
Обложку оформила О.Н. Никитина

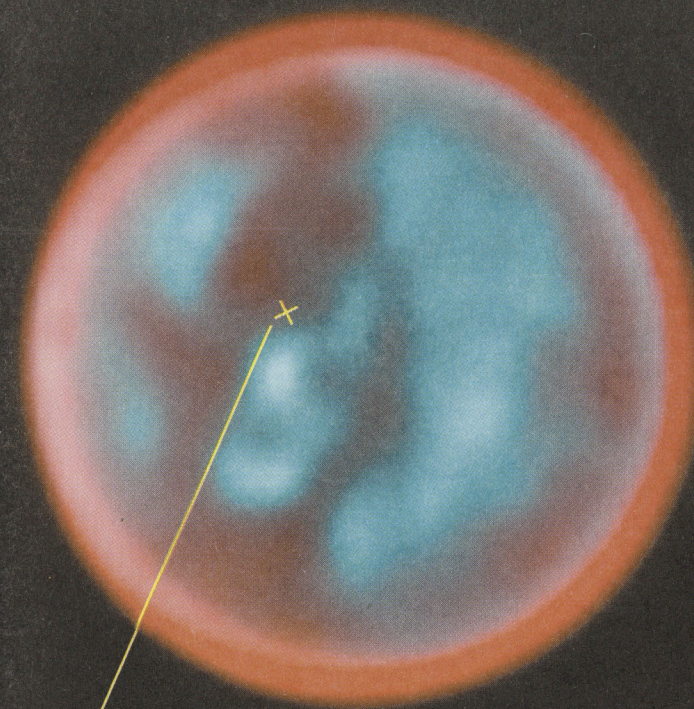
Сдано в набор 06.05.2005. Подписано в печать 23.06.2005. Формат бумаги 70×100¹/₁₆
Офсетная печать. Уч.-изд. л. 12.0. Усл.печ. л. 9.1. Усл.кр.-отт. 7.3 тыс. Бум. л. 3.5
Тираж 779 экз. Заказ № 355

Свидетельство о регистрации № 2119 от 28.06.91

Учредители: Российская академия наук, Президиум
Адрес издателя: 117997 Москва, Профсоюзная ул., 90
Адрес редакции: 119991 Москва, Мароновский пер., 26
Телефоны: (факс) 238-42-32, 238-29-66
E-mail: zevs@naukaran.ru

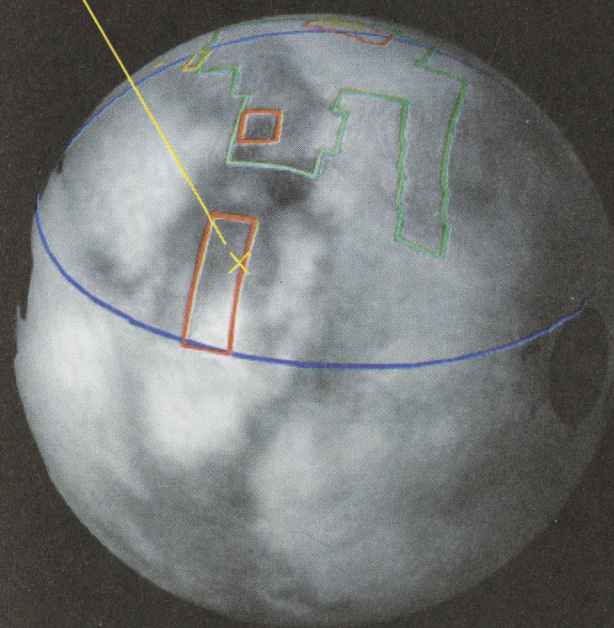
Web-страница журнала: <http://ziv.telescopes.ru>
Оригинал-макет подготовлен МАИК “Наука/Интерпериодика”

Отпечатано в ППП “Типография Наука”
121099 Москва, Шубинский пер., 6



б

Место
посадки



а

